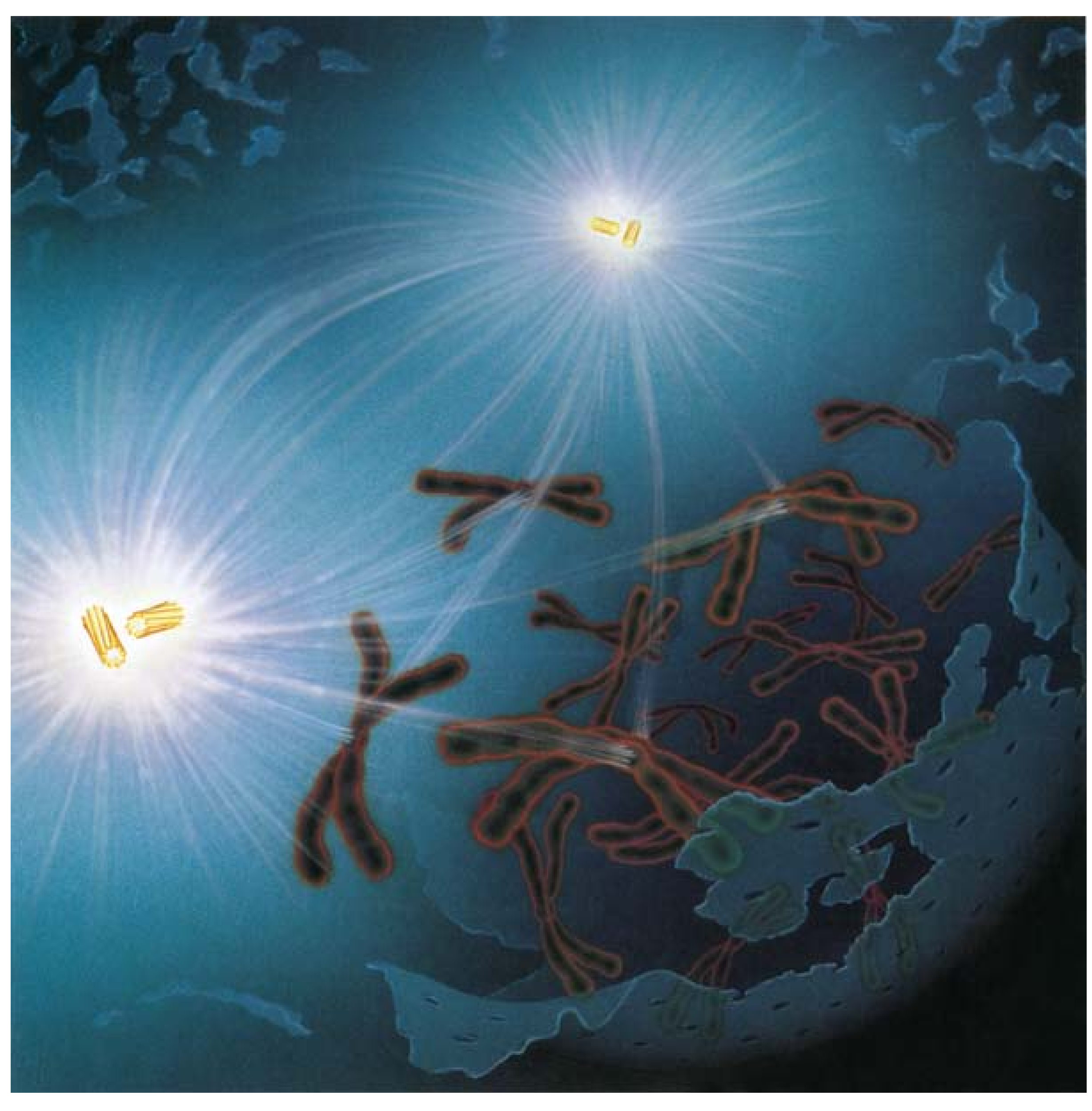
INVESTIGACION y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

GALAXIAS PRIMITIVAS Y ORIGEN DEL UNIVERSO

ECOLOGIA DE LOS RIOS MEDITERRANEOS

CALOR FOSIL: UN ARCHIVO DEL CAMBIO CLIMATICO



EL CENTROSOMA

AGOSTO 1993
700 PTAS.




Agosto de 1993 Número 203

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M. Puigcerver: *Archivos subterráneos del clima cambiante* y *La fusión de los hielos antárticos*; Mónica Murphy: *Radiogalaxias remotas*; Esteban Santiago: *El centrosoma*; Joandomènec Ros: *Monogamia en la ratilla de pradera*; M. Márquez Rowe: *El autismo*; Carmen Santamaría y Nicolás García Tapia: *El gran pozo de China*; J. Vilardell: *Hace...*; Shigeko Suzuki: *De cerca*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*

Ciencia y sociedad:

José Sánchez-Prieto, Inmaculada Herrero Sastre y M.ª Teresa Miras Portugal, Emilio Elizalde, Pilar Bayer, J. Tejada y X. X. Zhang

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

Libros:

Luis Alonso, Agustín Albarracín, Enric Banda y Luis Mas

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: Gary Carlson

Página	Fuente
7	Dan Wagner Roberto Osti (*arriba*), Jared Schneidman Design (*abajo*)
9	Jared Schneidman Design
10	Patrick Cone (*arriba*), Jared Schneidman Design (*abajo*)
11-12	Jared Schneidman Design
15	A. T. Kamajian (*arriba*), G. K. Miley y K. C. Chambers, Willen J. M. van Breugel, Lab. Nac. L. Livermore, y F. Duccio Macchetto, Inst. Ciencias Telescopio Espacial (*abajo*)
16	A. T. Kamajian (*arriba*), A. Stockton, Univ. Hawai (*abajo, izda.*), Observatorio Nac. Radioastronomía/Associated Universities, Inc. (*abajo, dcha.*)
17	Alfred T. Kamajian (*arriba*), Johnny Johnson (*abajo*)
18-19	Alfred T. Kamajian (*arriba*), George K. Miley *et al.* (*abajo*)
20-21	Johnny Johnson
22	Science Photo Library/Photo Researchers, Inc.
23	Photo Researchers, Inc.
24-25	Dimitry Schidlovsky
26	David M. Glover
27	Lisa Frenz, Universidad de Dundee
28	Dimitry Schidlovsky; David M. Glover (*fotografía*)
31	Pere-Lluis León
44-45	IBM Corporation
46-47	Johnny Johnson
48-49	IBM Corporation
51-53	Lisa Davis, Universidad de Illinois
54	P. J. Wynne y M. Goodman
55-56	Patricia J. Wynne
59	Abraham Menashe
60	Rodica Prato
61	Jared Schneidman Design
62-64	Abraham Menashe
66-67	Jason Küffer y Tomo Narashima
68	Cortesía de Hans Ulrich Vogel (*arriba*), Johnny Johnson (*abajo*)
69-70	Michael Goodman
71	Museo de Historia Zigong Salt, Sichuan, China
73	Inst. Cartográfico de Cataluña
74	Sergi y Francesc Sabater, J. Armengol y A. Aragón
75	S. y F. Sabater y J. Armengol
76	S. y F. Sabater, J. Armengol y A. Aragón
77	S. y F. Sabater y J. Armengol
78	S. y F. Sabater, J. Armengol y A. Aragón
86-88	Johnny Johnson



LA PORTADA representa la división celular durante la profase, uno de los estadios primeros. A medida que los cromosomas replicados se condensan y la membrana nuclear comienza a deshacerse, los centrosomas emigran hacia polos opuestos del núcleo. Esos orgánulos son los centros de las asociaciones asteriformes de microtúbulos. Cada uno contiene un par de centriolos. Los detalles de la estructura y de la función del centrosoma han empezado a salir a la luz sólo recientemente (véase "El centrosoma", por David M. Glover, Cayetano González y Jordan V. Raff, en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
Juan Pedro Campos
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
M.ª Cruz Iglesias Capón
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; John Rennie, Russell Ruthen, *Associate Editors*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; John Horgan; Marguerite Holloway; *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.400	15.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD
Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Hace...

... cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Fred C. Kelly, autor del pugnaz, y recién publicado, libro 'Los hermanos Wright; biografía autorizada por Orville Wright', demuestra un hecho indiscutible: que el director de esta revista tardó mucho tiempo en convencerse de que las noticias relativas a los primeros vuelos de los hermanos Wright eran fidedignas. Casi tres años mediaron entre sus primeros vuelos propulsados y el pleno reconocimiento por parte de esta publicación, en el número del quince de diciembre de 1906, de que se les debía 'la memorable invención de la primera máquina voladora'. En una época como la nuestra, de gacetilleros que escriben a vuela pluma, tal demora resulta difícil de entender. Retrocedamos en el tiempo. Los Wright volaron y volaron y volaron sobre un campo cercano a Dayton (Ohio) a lo largo de 1904 y 1905 ante los ciegos ojos del mundo. Pese a un sinfín de dificultades, consiguieron efectuar vuelos de 5, de 18, de 25, de 38 minutos, pero ¡ni aún así merecieron ser noticia! Sin duda, los perspicaces reporteros de Dayton no lo eran tanto como nuestros confiados jefes de redacción creían. Fueron ellos más que nadie quienes dejaron caer en el vacío las sensacionales noticias referentes a los Wright. Y Fred Kelly, según él mismo afirma en su libro, era por entonces un reportero que vivía a sólo unos ¡18 km del lugar de los experimentos!»

«Se revela ahora el papel que la industria americana de la radio, en cooperación con la Armada y el Cuerpo de Transmisiones del Ejército de Estados Unidos, jugó en el desarrollo de la revolucionaria ciencia de la detección y rastreo por radio. Inició la investigación la Radio Corporation of America ya en 1932. En 1937 se terminó y ensayó un equipo operativo capaz de señalar la distancia y posición de objetos reflectores, casi en la misma forma en que ahora se emplea en gran parte de los modernos equipos de radar. Westinghouse y RCA produjeron para el Cuerpo de Transmisiones partes de su primer aparato de radar, tal como el que operaba en Pearl Harbor el siete de diciembre de 1941. Es un hecho comprobado que el radar advirtió de la aproximación de los aviones japoneses en aquella mañana fatídica, pero el informe del operador no fue escuchado. En septiembre de 1941 el radar permitió a la Royal Air Force, numéricamente inferior, hacer retroceder a la hasta entonces invencible Luftwaffe de Hitler.»

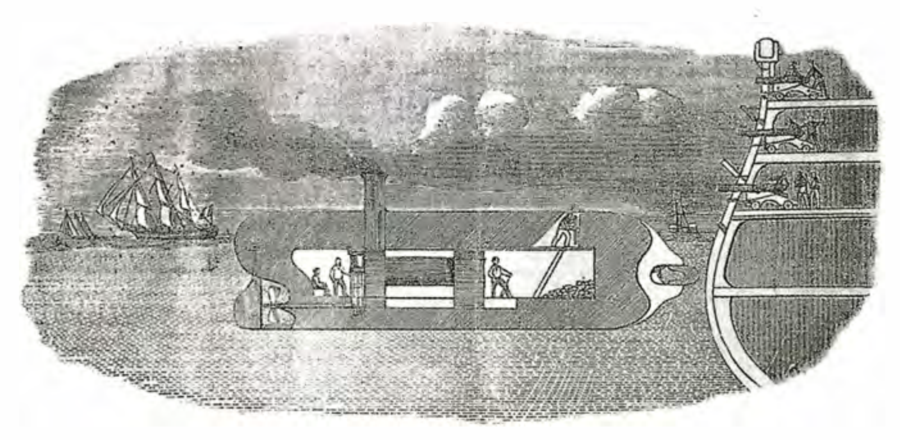
... cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «El Departamento de Agricultura ha remitido circulares requiriendo informes, que cubrirán un territorio muy amplio, acerca de las 'langostas de los diecisiete años', que este año hicieron su aparición en ocho estados de la Unión. El propósito del Departamento es comprobar exactamente los límites de las zonas ocupadas por los insectos. Hablando estrictamente, no se trata de langostas sino de cigarras. Hace algunos años se pretendió que estos insectos podrían ser un alimento nutritivo; pero los experimentos al efecto no dieron resultados esperanzadores.»

«A juzgar por los restos de extensas obras de riego de gran antigüedad, se puede afirmar con seguridad que los canales principales construidos y utilizados por los antiguos habitantes del Valle Salado de Arizona controlaban el riego de más de 100.000 hectáreas. Esos canales son modelos a imitar por los agricultores modernos; sin embargo, no cabe concebir que se abrieran de otra manera que no fuera mediante un laborioso proceso de excavación manual con utensilios de piedra o madera.»

«Por fin, tras tres años de preparativos, ha zarpado del puerto de Cristianía (Noruega), rumbo al norte, la expedición polar del doctor Fridtjof Nansen. Su barco es el Pram (Progreso), el primero especialmente proyectado y construido para las investigaciones árticas; es un modelo de robustez, pero resulta un poquito pequeño para la cantidad de provisiones que transporta, por lo cual se hundió tanto en el agua que hubo que aumentar la altura del forro metálico antihielo. La iluminación será eléctrica o con lámparas de petróleo. La dinamo puede ser accionada por vapor, por el viento o manualmente. Se montará un gran molino de viento en la cubierta, donde asimismo hay un torno que ha de ser manejado por cuatro o más hombres y al que a diario se recurrirá durante los meses de invierno, para que los hombres hagan ejercicio en la oscuridad. Los hornos pueden quemar petróleo, e incluso grasa de ballena; el barco, con petróleo, alcanzó durante un viaje de pruebas la misma velocidad que habría tomado con carbón.»

«Hace más de cuarenta años, a saber, el diecinueve de febrero de 1853, *Scientific American* publicaba ilustraciones del torpedero de James Nasmyth (abajo). Se concede ahora un singular interés a esta embarcación submarina, dado que un comité del Departamento de la Armada va a seleccionar un tipo de buque submarino, para cuya construcción el Congreso ha asignado 200.000 dólares. El mortero flotante de Mr. Nasmyth consiste, más que nada, en una enorme granada de explosión automática, que forma parte integrante de la embarcación. La explosión de la granada es absorbida por toda la masa del mortero flotante.»



Torpedero de Nasmyth

Archivos subterráneos del clima cambiante

Con las perforaciones de la roca continental se recuperan temperaturas fósiles que revelan el clima de eras pasadas. Los resultados requieren una cuidadosa interpretación

Henry N. Pollack y David S. Chapman

¿Se está haciendo más cálido el clima terrestre? No faltan pruebas que lo avalan. Según los registros meteorológicos, la temperatura media de la Tierra ha aumentado poco más de medio grado a lo largo de los últimos cien años. Las muestras preservadas de aire, entre otras fuentes de datos, indican que durante ese período ha subido también el nivel de los gases que impiden que el calor terrestre escape. La proporción de dióxido de carbono en la atmósfera se ha elevado en más de un 20 por ciento; la de metano se ha doblado, más o menos. Correlación que nos sugiere dónde yace la causa del fenómeno observado: parece razonable pensar que la culpa la tienen los gases de invernadero. Pero el caso no está cerrado. Nada impide que el crecimiento simultáneo de la temperatura y de los gases de invernadero sea mera coincidencia estadística, sin que exista relación a largo plazo entre una y otra magnitud.

¿Cómo podrían los climatólogos resolver la cuestión? Tienen ya en sus manos la mitad de los datos necesarios: las burbujas de aire aprisionadas en los casquetes polares y en los glaciares archivan los cambios que la composición de la atmósfera ha sufrido durante milenios. La otra mitad, la que se refiere al registro de temperaturas, presenta más dificultades: hasta hará unos 150 años no se generalizó la toma de datos meteorológicos, el registro exhaustivo de los concernientes al hemisferio Sur hubo de esperar a nuestro siglo y, por último, no hace todavía muchos años, los datos de las regiones polares adolecían de importantes lagunas [véase "Tendencias hacia el calentamiento global", por Philip D. Jones y Tom M. L. Wigley; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1990]. Hay, no obstante, un archivo que es, si se sabe dar con él, legible. A imagen de las capas anuales de hielo ártico y antártico, que conservan diminutas burbujas de aire, el suelo retiene temperaturas fósiles, cuyo origen se remonta al clima de otros siglos.

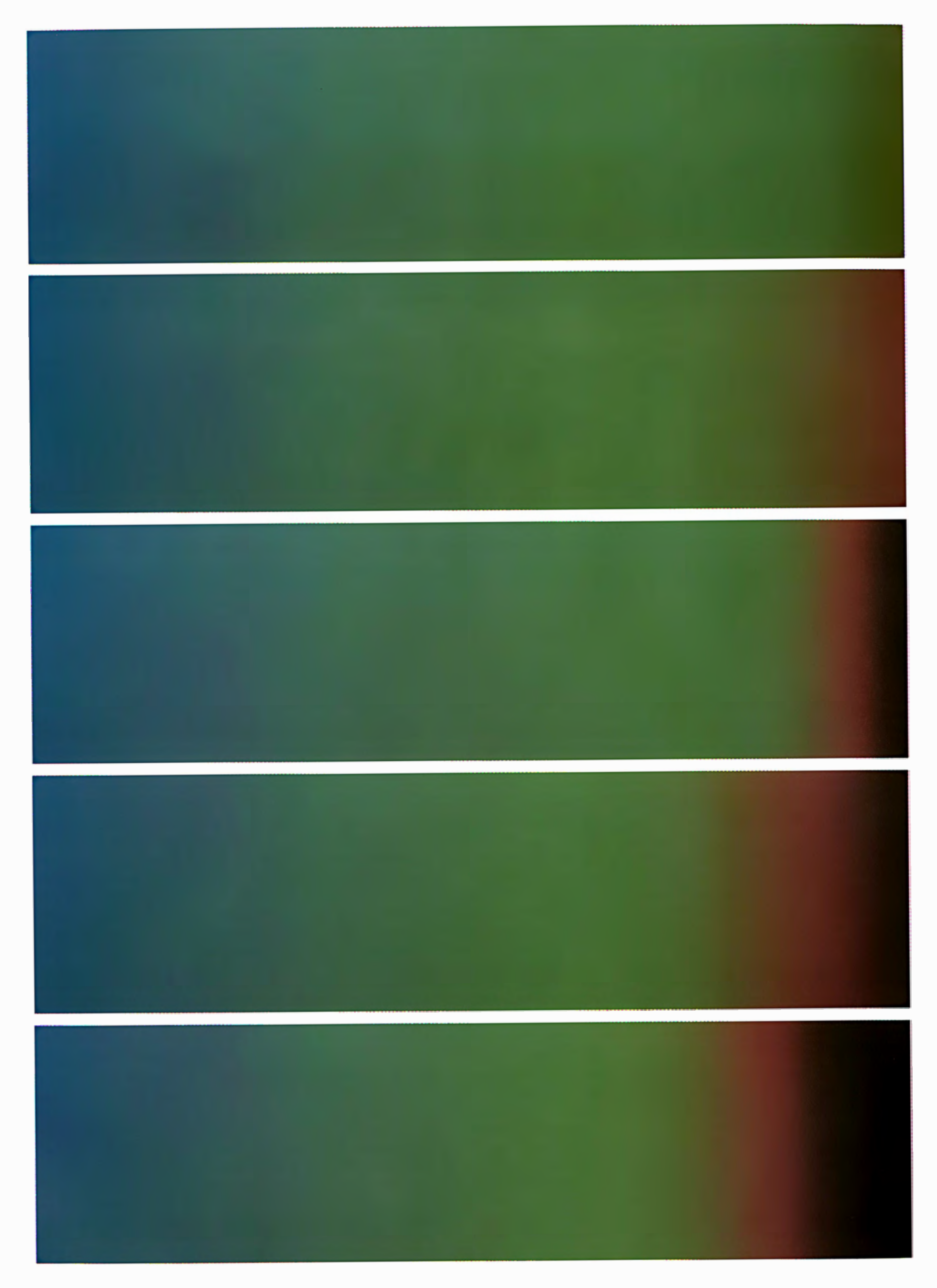
El archivo está, en principio, por todas partes. Para leerlo basta con abrir una perforación en el suelo por cuyo hueco descienda un termómetro sensible; de esa forma se obtendrá un perfil de la temperatura en función de la profundidad. Aunque habrá que superar muchos obstáculos antes de que los testigos subterráneos proporcionen una reconstrucción inequívoca de las temperaturas que había antaño en la superficie terrestre, se confía en ellos para descifrar la historia enterrada de la Tierra.

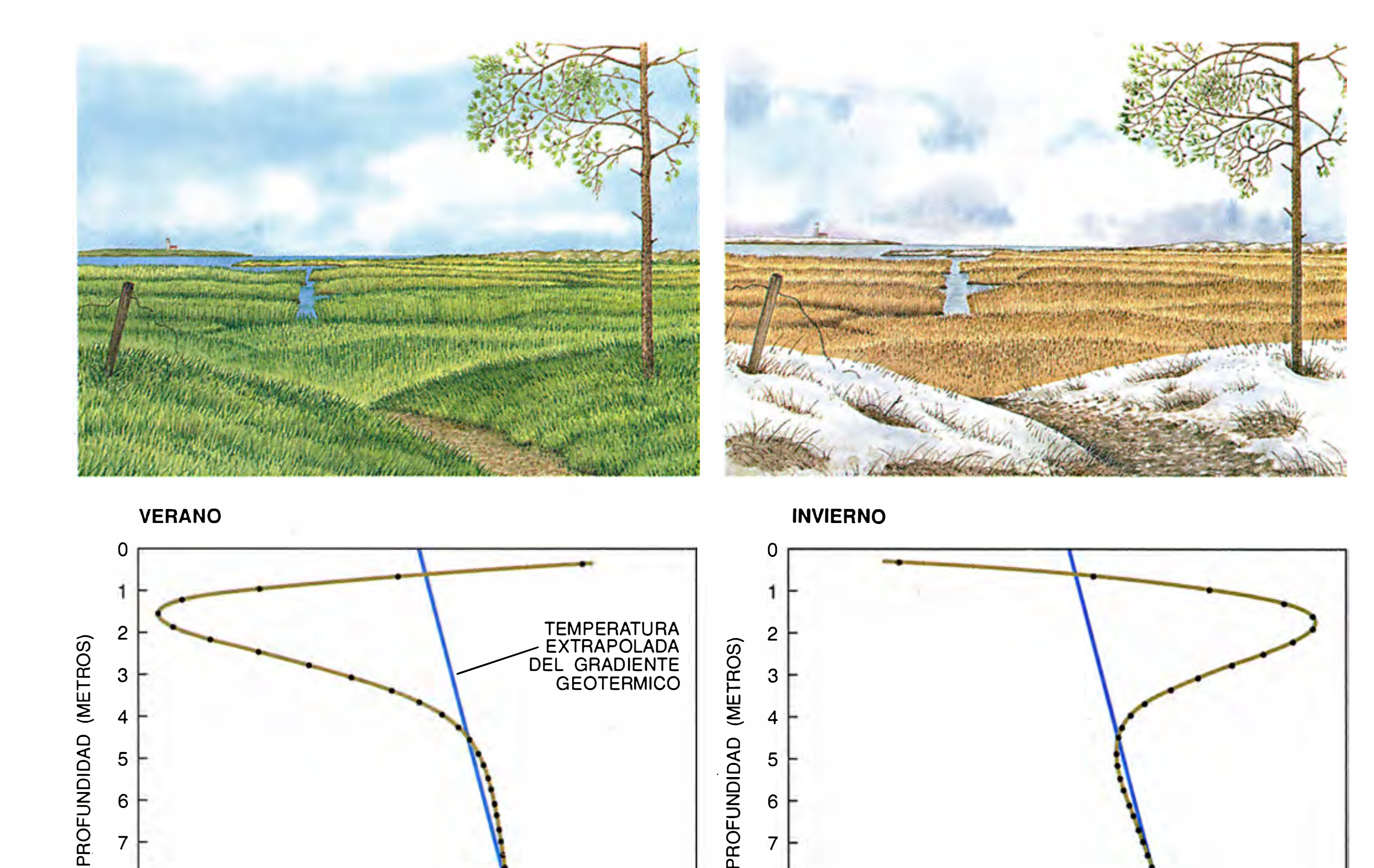
Los geofísicos, que llevan más de treinta años tomándole la temperatura al subsuelo, están leyéndolo ya; eso sí, han empezado a hacerlo más bien por accidente. Les interesaba conocer el gradiente geotérmico (el ritmo al cual la temperatura aumenta con la profundidad) y medir el flujo de calor desde la corteza terrestre a él asociado [véase "Flujo de calor desde el interior de la Tierra", por los autores, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1977]. Hasta que, por fin, cayeron en la cuenta, y no hace mucho, de que el "ruido" que perturbaba los datos de temperatura correspondientes a los primeros cientos de metros bajo la superficie era la huella de factores externos —el cambio climático entre ellos— que modifican la temperatura de la parte superior de la corteza.

En 1986 se atisbó ya que las perforaciones ofrecen indicaciones útiles sobre el clima. Arthur H. Lachenbruch y B. Vaughn Marshall, del Servicio de Inspección Geológica de los Estados Unidos, hallaron que los perfiles de temperatura de ciertas perforaciones en el permafrost de Alaska mostraban, cerca de la superficie, perturbaciones que obedecían a un mismo patrón. Concordaba éste con un calentamiento de la superficie del permafrost entre dos y cuatro grados a lo largo del siglo. No fueron Lachenbruch y Marshall los primeros en sugerir que los perfiles de temperatura de las perforaciones contenían información sobre las condiciones cambiantes de la superficie, pero su descubrimiento coincidió con un momento de especial revuelo entre los geofísicos ante la posibilidad de que se estuviese produciendo un calentamiento global.

HENRY N. POLLACK y DAVID S. CHAPMAN llevan más de 20 años trabajando juntos en investigaciones geotérmicas. Pollack, catedrático de geofísica en la Universidad de Michigan, obtuvo el doctorado en 1963. Preside la Comisión Internacional de Transmisión de Calor. Chapman, doctorado en 1976, enseña geología y geofísica en la Universidad de Utah.

1. GRADIENTE TERMICO en una lámina de aluminio calentada por un extremo y enfriada por otro, visible gracias a cristales líquidos sensibles a la temperatura (*arriba*). Este gradiente es, en su idea básica, similar al que suele observarse en el interior de la corteza terrestre. Si, en analogía con el calentamiento o enfriamiento climático, el lado derecho se calienta ligeramente, la perturbación térmica resultante se propaga a través del material (*imágenes sucesivas*). Los autores han hallado anomalías parecidas en la medición de perfiles de temperatura del subsuelo; les sirven para reconstruir el clima del pasado.





2. PERFILES DE TEMPERATURA correspondientes a una turbera marismeña. Ilustran la propagación descendente de las variaciones estacionales hasta acabar por amortiguarse. Por debajo de los 15 metros de profundidad, desaparecen las variaciones anuales y sólo son visibles las de largo período, climáticas.

Apenas transcurrido un año, en una reunión de la Unión Geofísica Americana, nos dijimos el uno al otro que también nosotros habíamos visto muchos registros de temperatura, procedentes de perforaciones, que presentaban perturbaciones similares. Desde entonces, hemos venido explotando esa mina de las temperaturas del subsuelo para determinar la variación regional de la temperatura de la superficie terrestre a lo largo de los últimos siglos; otros investigadores han procedido igual.

Para entender cómo retiene la Tierra la sucesión de temperaturas de su superficie, conviene recordar las nociones fundamentales de la teoría de la propagación del calor. El calor tiende a propagarse a través de las rocas de la corteza por conducción. (Dado que las aguas subterráneas transporan calor también, los climatólogos deben evitar las zonas de sondeo donde el fenómeno tenga ya cierta entidad.) Cuando la superficie de un material conductor experimenta una variación de temperatura, la alteración se propaga hacia el interior a medida que las moléculas de mayor energía chocan con sus vecinas y les ceden calor. Puede mostrarse este fenómeno aplicando una lámpara de soldar al extremo de una varilla metálica: además de volverse incandescente el extremo, se pondrán rojas también, pasado algún tiempo, las porciones adyacentes de la varilla. Sumerjamos, luego, el extremo incandescente de la varilla en hielo: la recorrerá, cuan larga es, una onda de enfriamiento subsiguiente a la ola de calentamiento. Lo mismo sucede aquí; las fluctuaciones de temperatura en la superficie de la Tierra se propagan hacia abajo a través de las rocas.

Mientras no ahondemos mucho bajo la superficie, las fluctuaciones térmicas del subsuelo se retrasarán semanas o meses con respecto a las variaciones de la temperatura superficial; los labriegos tienen un dicho que expresa su conocimiento de este hecho: "en primavera la helada va por dentro". En primavera, la superficie está ya más caliente que en invierno, pero las bajas temperaturas de éste han ido a parar al subsuelo: se las encontrará unos pocos metros por debajo de la superficie.

En su propagación hacia abajo, las oscilaciones de la temperatura de la superficie se van amortiguando progresivamente hasta anularse. Sin embargo, las fluctuaciones de período más corto se atenúan antes que las de período más largo. El ciclo diurno de días cálidos y noches frescas perturba sólo el primer metro de suelo o roca; por su parte, la oscilación estacional no penetra más que unos 15 metros antes de que se pierda la señal. Frente a ello, un ciclo de un siglo de duración se detectará a profundidades de unos 150 metros,

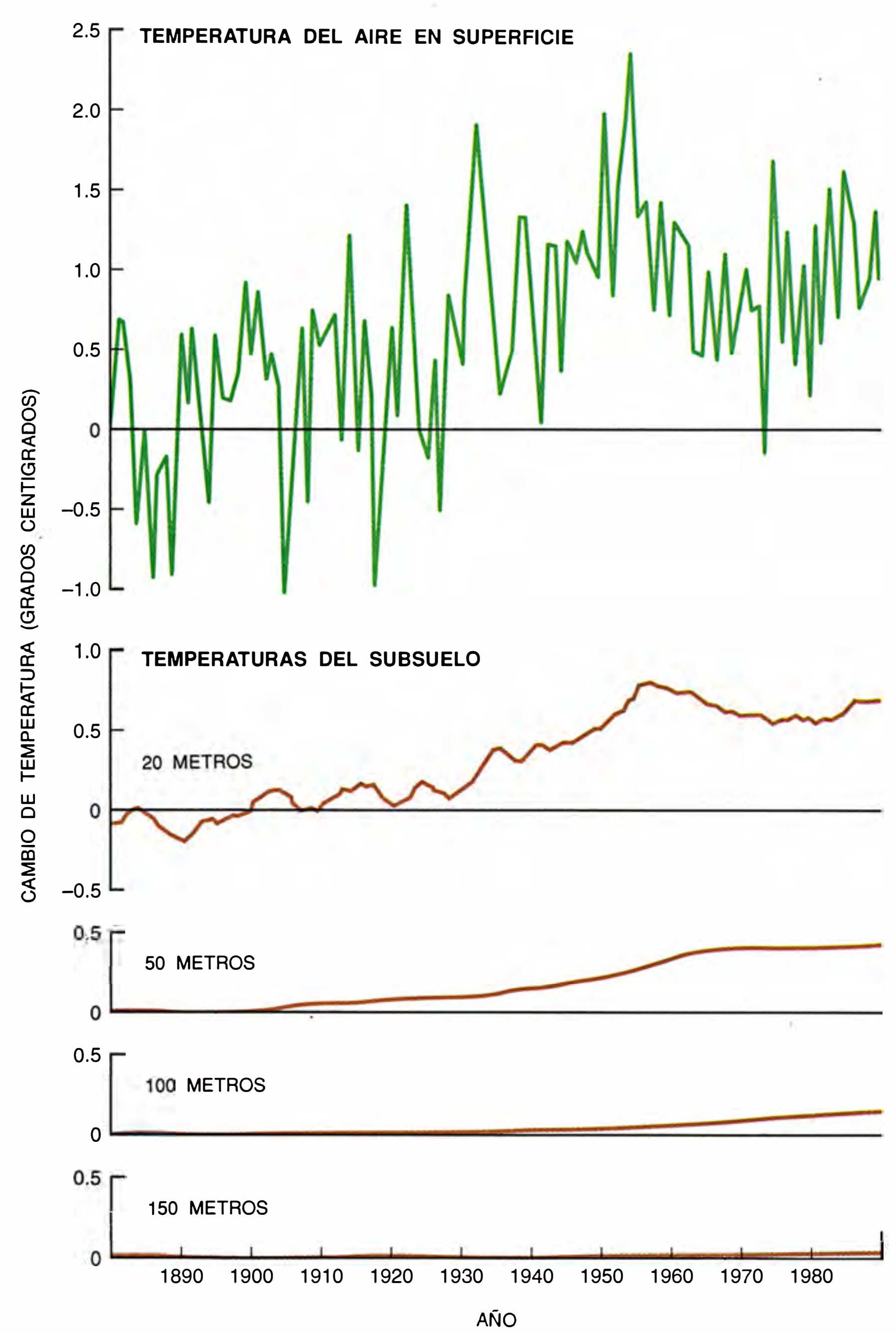
y un período de un milenio, a 500. De esta manera, la Tierra retiene selectivamente las tendencias a largo plazo y excluye del archivo las desviaciones de período corto. Esta propiedad viene muy bien para el registro del clima.

Además, se accede con suma facilidad a los archivos subsuperficiales del cambio climático. Debido a la lenta propagación de las señales térmicas, todas las variaciones de la temperatura de la superficie producidas durante el último milenio han quedado registradas en los 500 metros superiores de la corteza terrestre, profundidad a la que se llega sin dificultad mediante perforaciones poco costosas.

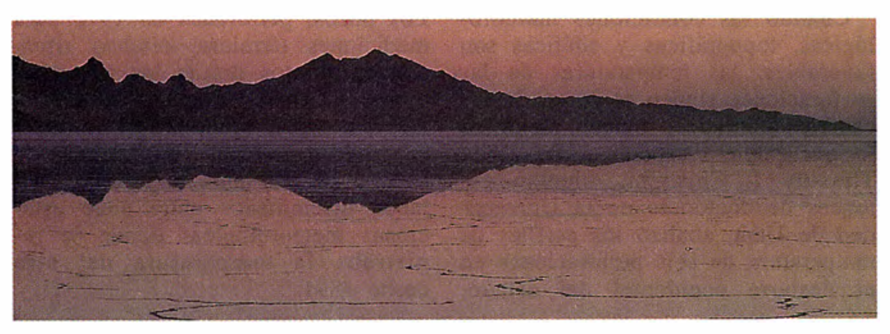
Conocido ya el mecanismo por el cual las perturbaciones térmicas dejan, al propagarse, huellas de climas pretéritos, podemos ahora recorrer el camino inverso para extraer de las perforaciones el registro histórico escrito en esas huellas. Conviene empezar por identificar la marca térmica del calor que se abre paso hacia arriba, a través de la corteza, para separarla de la señal debida al clima. En las regiones donde la roca es de un mismo tipo, este flujo de calor de las profundidades se caracteriza por el aumento térmico a razón constante con la profundidad; este gradiente constante suele manifestarse a escasos centenares de metros bajo la superficie.

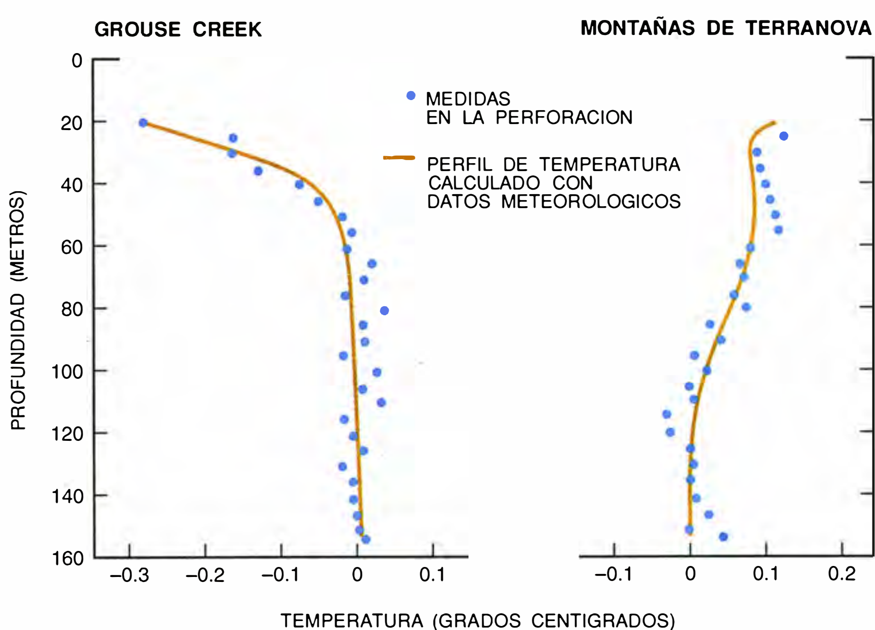
Si el clima terrestre no cambiase nunca, tal perfil lineal se extendería hasta la misma superficie. Por consiguiente, extrapolando la parte lineal del perfil de temperatura hacia arriba, sería posible determinar cuál habría sido la temperatura a profundidades someras de no haberse producido la anomalía térmica. La diferencia entre el valor en superficie del gradiente geotérmico extrapolado y la temperatura real en la superficie indica la cantidad total de calentamiento, o de enfriamiento, que ha tenido lugar. Además, la profundidad a la que el perfil medido se separa del gradiente geométrico imperturbado está relacionada con la época en que comenzó el cambio climático. Podemos desentrañar las características del perfil entre la superficie y la zona sin perturbar de más abajo para conocer el ritmo y variabilidad de los cambios. Por dar un ejemplo: un episodio de calentamiento seguido de un largo intervalo frío estaría representado por temperaturas anormalmente altas en la perforación cerca de la superficie y anormalmente bajas a mayor profundidad.

Cuando las condiciones meteorológicas, topográficas y edáficas son favorables, las temperaturas de las perforaciones siguen el curso de los cambios climáticos mucho mejor de lo que pudiera esperarse. En 1990, Timothy J. Chisholm, alumno entonces de doctorado en la Universidad de Utah, analizó los perfiles de temperatura de seis perforaciones en el desierto occidental del estado. Los pozos, perforados en 1978 para mediciones térmicas, estaban situados en puntos donde las perturbaciones causadas por la topografía, arroyos, lagos, acumulación de nieve o actividad humana eran mínimas. Y lo que es aún más importante, estaban diseminados entre siete estaciones meteorológicas donde se registraba la temperatura del aire desde 1891.



3. LA HISTORIA CLIMATICA RECIENTE se refleja tanto en los registros meteorológicos (*gráfica de arriba*) como en las temperaturas del subsuelo a diversas profundidades (*gráficas de abajo*). Las gráficas muestran las temperaturas del aire en la superficie en Nueva Inglaterra a lo largo de los últimos cien años y las desviaciones operadas en el subsuelo, conforme la variación en la superficie se propaga hacia abajo. La tendencia hacia el calentamiento se ha percibido a 150 metros de profundidad, pero las temperaturas allí seguirán mostrando el calentamiento de este siglo durante muchos años, suceda lo que suceda en la superficie.





4. MEDICIONES EFECTUADAS EN PERFORACIONES, que revelan una estrecha concordancia con las temperaturas en el subsuelo sintetizadas a partir de los registros de dos estaciones meteorológicas situadas en lugares distintos de Utah occidental (*arriba se muestra una fotografía de las Montañas de Terranova*). Las temperaturas de subsuelo no siempre guardan, en otros lugares, idéntica correlación con las del aire: la cubierta de nieve —y otros factores— aíslan el suelo de las temperaturas extremas.

De los resultados de Chisholm se desprende que la región se ha estado calentando. Cinco perforaciones presentan perfiles de temperatura coherentes con un aumento medio de 0,4 grados centígrados durante los últimos decenios; la sexta nos muestra un enfriamiento de 0,9 grados. El archivo del subsuelo en cada punto guarda una estrecha correlación con las temperaturas del aire en las estaciones meteorológicas más próximas; de hecho, la perforación con la marca de reciente enfriamiento es la más cercana a la única estación meteorológica de la región donde la temperatura media del aire disminuyó durante los últimos cien años. Chisholm construyó también perfiles de temperatura basados en el flujo de calor desde el interior de la Tierra, conocidos de antemano, y en los datos meteorológicos; estas curvas teóricas evidencian una notable semejanza con las curvas reales de los sondeos más próximos.

Tan estrecha coincidencia es alentadora; mas, por desgracia, se trata de la excepción, no de la regla. Los perfiles de temperatura de los pozos y los datos meteorológicos no suelen concordar en sus pormenores. Las temperaturas del interior de la Tierra registran fielmente la historia térmica de la superficie sólida, pero a los meteorólogos les interesa la temperatura del aire. El acoplamiento térmico de la atmósfera con la superficie no es un proceso sencillo, y la señal de temperatura que el suelo recibe es con frecuencia una versión filtrada de lo que en la atmósfera sucede.

En las regiones donde se acumula la nieve durante el invierno, la capa protectora que se forma aísla el suelo de las fases más frías del ciclo anual. En el Canadá central, la temperatura del aire puede caer hasta los —20 grados a mediados del invierno, pero la temperatura del suelo oscila alrededor del punto de congelación. Por el contrario, el calor del verano no encuentra barreras, y se transmite al subsuelo. Esta protección invernal puede dar lugar a una diferencia de varios grados entre las temperaturas medias anuales del suelo y las del aire; el efecto es menor donde los inviernos no son tan rigurosos.

A latitudes todavía mayores, la parte superior del suelo permanentemente helada está separada del aire por la nieve y por una capa activa que se deshiela y congela cada año. En consecuencia, aunque el permafrost registra muy bien las desviaciones de la temperatura de la superficie, sólo se descubrirán los efectos del cambio climático si se desenmaraña la complicada distribución del intercambio de calor a través de esas capas.

En las regiones templadas y tropicales intervienen otros factores que inducen a confusión. Los cultivos o la sombra de los árboles, que aíslan el suelo de los calores estivales, no impedirán que se enfríe en invierno. Los cursos de aguas subterráneas pueden también perturbar las temperaturas del subsuelo. Donde la obra humana media, el cuadro es todavía más complicado. La deforestación y el avance de los campos de labor dejan el suelo más expuesto a la radiación solar. La desecación o la inundación de marismas elimina el efecto de enfriamiento propio de la evaporación y causa el calentamiento de la superficie. La urbanización también conduce al calentamiento: carreteras y edificios absorben energía solar, que transmiten al suelo; incluso el calor que se filtra desde nuestros sótanos en invierno perturba la relación entre las temperaturas del aire y del subsuelo. Muchas de esas modificaciones del ambiente se han hecho generales a lo largo de los últimos cien años, y podrían exagerar o velar el calentamiento global archivado en el suelo.

Además, algunos aspectos de la topografía, hidrología y vegetación locales provocan enfriamientos o calentamientos del subsuelo que podrían tomarse erróneamente por cambios climáticos regionales. El gradiente geotérmico suele aumentar bajo los valles y disminuir bajo las colinas. Ambos efectos decrecen con la profundidad bajo la superficie irregular, pero a pequeñas profundidades producen distorsiones de temperatura iguales a las que generarían las variaciones de temperatura en la superficie. Por otra parte, hay mu-

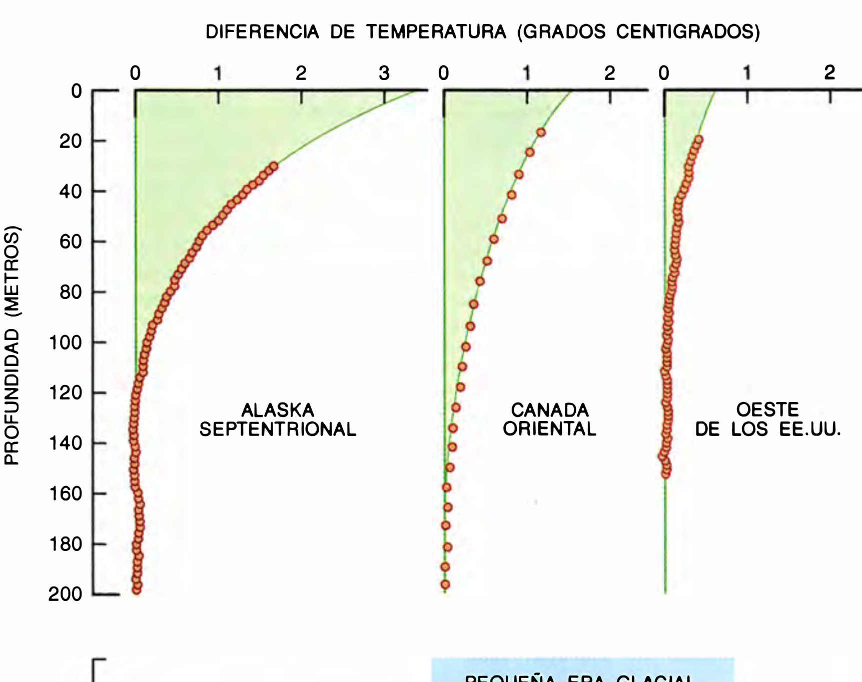
chos lagos que no se hielan del todo en invierno, y por ello sus fondos calientes influyen en las temperaturas de los subsuelos próximos. Los cursos freáticos que condicionan la temperatura de superficie dejan una huella que en ocasiones se parece bastante a la que provoca un cambio de temperatura en la propia superficie.

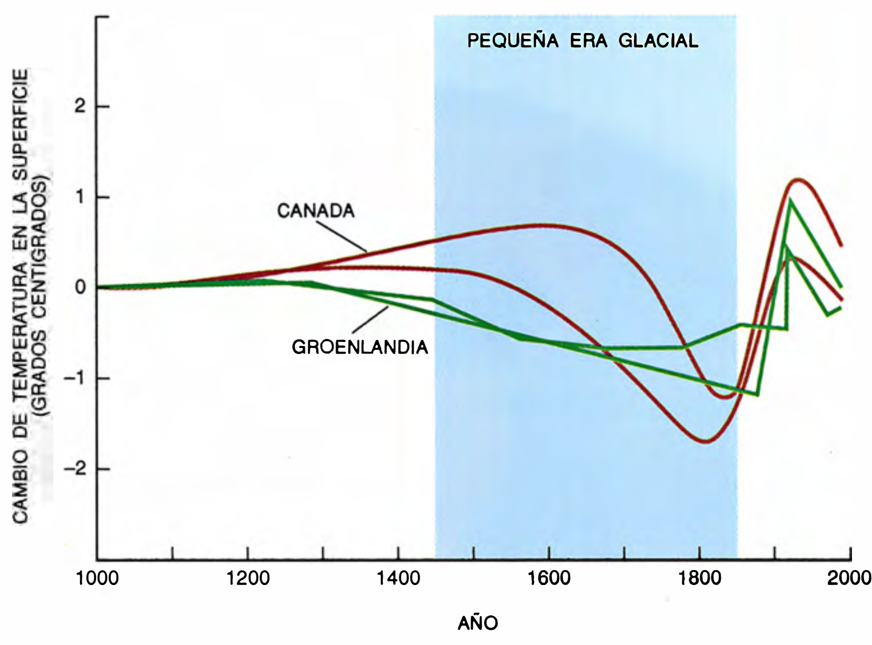
Aunque estas perturbaciones térmicas de origen geológico frustrarán a quienes busquen una correlación inmediata entre los archivos de las perforaciones y el cambio climático, la verdad es que se pueden hacer modelos de muchas de aquéllas, así como estimar sus magnitudes. En muchos casos, se puede corregir el perfil de temperatura descontando esos efectos. Además, el archivo geotérmico no consta de una única perforación. Una variación será real si los perfiles de temperatura de perforaciones que estén distribuidos por cientos de kilómetros de terreno continental muestran unas mismas perturbaciones. Es muy improbable que todos los pozos presenten condiciones y perturbaciones idénticas debidas a la topografía, la vegetación y la estructura geológica e hidrológica: una configuración térmica común se debe con seguridad al clima.

Se han analizado ya varios conjuntos de datos geotérmicos de Norteamérica, en busca de indicios de cambios de temperatura superficiales. Las investigaciones en el Artico de Alaska, llevadas a cabo por Lachenbruch y su equipo del Servicio de Inspección Geológica, han aportado una brillante prueba de la realidad del calentamiento. Los perfiles de temperaturas de perforaciones desperdigadas por el norte de Alaska, a lo largo de 500 kilómetros, muestran un calentamiento anómalo en los 100 a 150 metros superiores del permafrost y la roca. La duración del episodio de calentamiento parece variar en diferentes lugares, pero en casi todas partes se inicia en el siglo XX.

El calor adicional requerido para que se produzca el calentamiento observado en los 100 metros superiores del suelo en Alaska septentrional es pequeño: equivale a sólo un 0,2 por ciento, más o menos, de la radiación solar recibida por año en la región. Esta anomalía, demasiado pequeña para su medición directa, aparece con toda nitidez en los archivos geotérmicos. Además, aunque el aumento de entre dos y cuatro grados es sustancialmente mayor que el calentamiento global medio del siglo XX, concuerda con los datos de los registros meteorológicos polares.

Los sondeos acometidos en Ontario, Quebec y las Grandes Llanuras del Norte dan fe de un calentamiento menos espectacular, aunque perceptible. Las investigaciones han sido llevadas a cabo, independientemente, por Hugo Beltrami y Jean-Claude Mareschal, de la Universidad de Quebec en Montreal, Kelin Wang, Trevor Lewis y Alan Jessop, del Servicio de Inspección Geológica del Canadá, y Paul Shen y Alan E. Beck, de la Universidad de Ontario Occidental. Todos ellos han observado un calentamiento que en parte parece ser la recuperación siguiente a una tendencia al enfriamiento que se prolongó durante uno o dos siglos y que tocó fondo entre 1850 y 1900; sus resultados muestran unas elevaciones medias de temperatura de entre uno y dos gra-





5. LAS ANOMALIAS DE TEMPERATURA EN LAS PERFORACIONES (*arriba*) muestran la diferencia entre las temperaturas medidas en tres puntos y las que serían de esperar a tenor del gradiente geotérmico. El calentamiento parece haber comenzado hace unos 100 años en el Canadá oriental y Alaska septentrional; el cambio climático en el oeste de los Estados Unidos es más reciente y menos pronunciado. Las reconstrucciones de climas más remotos mediante perforaciones llevadas a cabo en Groenlandia y Canadá (*abajo*) indican no sólo la actual tendencia al calentamiento, sino también la existencia de la Pequeña Era Glacial, que comenzó en el siglo XV y terminó en el XIX.

dos en los últimos 100 o 150 años. Además, William D. Gosnold, de la Universidad de Dakota del Norte, ha deducido del dato que el aumento de la temperatura de la superficie fue de un par de grados en Dakota del Norte y Wyoming.

Los datos de Dakota del Sur y Nebraska, sin embargo, indican poco cambio a lo largo de los últimos 100 años; lo mismo ocurre con nuestro propio trabajo en el desierto de Utah occidental. La falta de una señal clara de calentamiento en estos casos coincide con las predicciones de los modelos del clima existentes, en los que el calentamiento global es intenso a altas latitudes, pero mínimo o incluso inexistente en algunas regiones templadas.

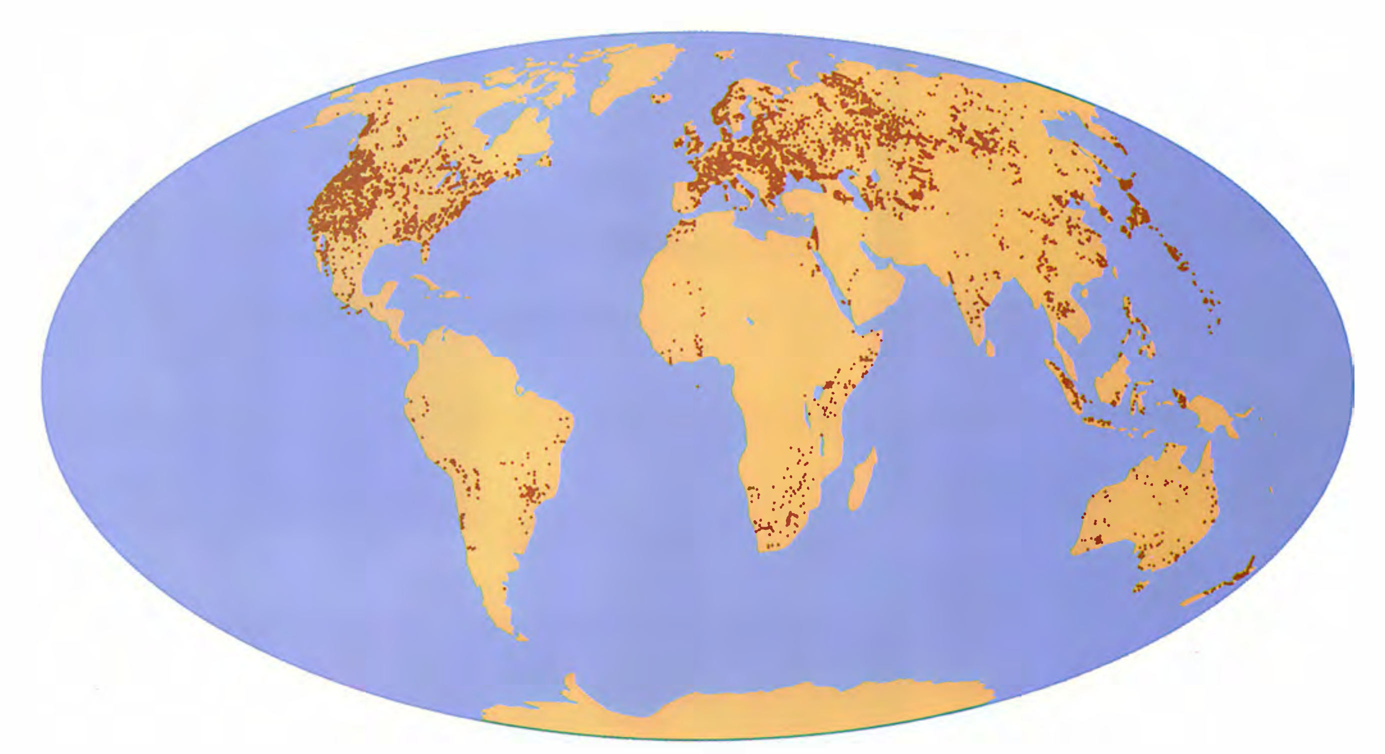
Estos resultados provisionales, correspondientes en su mayoría a Norteamérica, nos dicen que podemos descubrir, apoyándonos en los datos térmicos del subsuelo, las líneas generales de las variaciones térmicas (temporales y regionales) sufridas por la superficie de la Tierra a lo largo de los últimos cien años, por lo menos. Otros trabajos más recientes indican que se puede descifrar incluso el archivo climático subterráneo de épocas anteriores, y eso en gran parte de la superficie terrestre.

Las perforaciones realizadas en numerosos lugares de Europa, Norteamérica y Groenlandia muestran la marca característica de varios siglos de temperaturas bajas. El período frío empezó en distintos momentos de los siglos XV y XVI, y concluyó en el siglo XIX. Estos datos concuerdan con las descripciones que los cronistas de aquellos días nos han legado y con otras pruebas de la existencia de una Pequeña Era Glacial, en la que los glaciares avanzaron en muchos puntos del globo. Los datos de los pozos proporcionan información incluso sobre períodos anteriores, pero estas épocas se pueden ver hoy sólo "a través de un velo oscuro". Los historiales de temperaturas de superficie reconstruidos con los datos subterráneos muestran una pérdida progresiva de detalle: se hacen más genéricos. Pero la pérdida queda compensada con creces por la evaluación más y más fidedigna de la temperatura media a largo plazo para cada región.

Animados por los resultados obtenidos, los geofísicos han emprendido un proyecto concertado cuya finalidad es la obtención de más datos climáticos del subsuelo. La primera fuente a explotar son los propios registros geofísicos. En el otoño de 1991, la Comisión Internacional de Transmisión del Calor, asociación de investigadores geotérmicos organizada bajo los auspicios de la Asociación Internacional de Sismología y Física del Interior de la Tierra, estableció un nuevo grupo de trabajo, que habrá de reunir los datos recogidos en los miles de pozos perforados para investigación o explotación de los minerales durante los últimos treinta años. El grupo desarrollará una base de datos unificada con las temperaturas del subsuelo y otras informaciones pertinentes. Ese acopio de documentación, pensada para estudiar los procesos tectónicos globales, será la base del análisis global de las tendencias de la temperatura a lo largo de la historia.

Como cabría esperar, no existe una distribución uniforme del registro. Se han sondeado más los continentes septentrionales, y se ha recopilado mayor información de ellos que de los meridionales. Hay vacíos notables en los datos de regiones de la importancia de la cuenca amazónica, el desierto de Sahara y la Antártida. Para sacar el mayor partido posible de la información existente habrá que perforar en esas zonas y aprovechar los datos climáticos que se obtengan.

Se está considerando la posibilidad de volver a trabajar en pozos ya perforados, para así determinar directamente el cambio térmico operado en el subsuelo durante los últimos decenios. El localizar de nuevo antiguas perforaciones en zonas remotas y reseguir su trayectoria vie-



6. DESIGUAL DISTRIBUCION MUNDIAL de datos procedentes de perforaciones aptos para el análisis. La realización de un número mayor de perforaciones y mediciones en Sudamérica, Africa, Asia y la Antártida reforzaría notablemente el cuadro de la historia climática global que aquéllos generan.

ne a ser como buscar una aguja en un pajar, pero no es una tarea imposible. En colaboración con Edward R. Decker, de la Universidad de Maine, hemos vuelto a encontrar y explorar, hace poco, una serie de perforaciones que fueron realizadas en Nueva Inglaterra para investigaciones geotérmicas en los años sesenta. El análisis de los datos que hemos recogido nos permitirá establecer la evolución del campo térmico del subsuelo durante los 28 años que han transcurrido entre una medición y otra.

La tarea más importante que habrán de afrontar quienes deseen extraer datos climáticos globales de las temperaturas del subsuelo es la de integrar datos procedentes del máximo número posible de fuentes, diseminadas por todo el globo. Los archivos meteorológicos dan fe de una apreciable variabilidad regional en las temperaturas atmosféricas durante el siglo XX: unas zonas revelan un calentamiento que excede el promedio global, otras muestran calentamientos que quedan por debajo de él y las hay que incluso se han enfriado. Ninguna región por sí sola —excepto por coincidencia— proporciona una señal que represente el promedio global.

Además, la reconstrucción completa de la historia reciente del clima requerirá, en último término, algo más que el conocimiento de las temperaturas de superficie. El clima es una realidad compleja donde convergen la temperatura, la precipitación, el viento y otras variable. Se puede obtener información sobre algunos de esos factores a partir de fuentes dispares: la cronología y la química de los anillos de los árboles, las pautas de crecimiento de los corales, la estratigrafía de los testigos de hielo, los sedimentos de lagos y océanos, los archivos históricos, comerciales y agrícolas. Compete a los climatólogos formar con todas estas observaciones regionales de distinto cuño un cuadro global.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CHANGING CLIMATE: GEOTHERMAL EVIDENCE FROM PERMAFROST IN THE ALASKAN ARCTIC. Arthur H. Lachenbruch y B. Vaughn Marshall en *Science*, vol. 234, páginas 689-696; 7 de noviembre de 1986.

CLIMATIC CHANGE INFERRED FROM UNDERGROUND TEMPERATURES. Número especial de *Global and Planetary Change*, dirigido por Trevor Lewis, vol. 6, n.os 2-4, diciembre de 1992.

Radiogalaxias remotas

Se han identificado potentes radiogalaxias cuya existencia se remonta a la época en que el universo sólo contaba una décima parte de su edad actual. Estos objetos permiten vislumbrar las primeras etapas de la evolución de las galaxias gigantes

George K. Miley y Kenneth C. Chambers

En 1946, un grupo de investigadores del Real Instituto del Radar, en Malvern, descubrió que una pequeña región de la constelación del Cisne despedía intensas emisiones en longitudes de onda pertenecientes a la zona de radio del espectro. Siete años más tarde, Walter Baade y Rudolph Minkowski, de los Observatorios de Hale, enfocaron el gran telescopio de 5 metros de diámetro de monte Palomar a esa radiofuente. Dieron con un extraño objeto doble que, conjeturaron, podría estar formado por dos galaxias en colisión. Trabajos posteriores establecieron que la fuente, de nombre Cygnus A, se hallaba a una distancia remotísima: a 650 millones de años luz de la Tierra. Que pudiera detectarse un objeto tan lejano llevó a Baade y a Minkowski a la conclusión de que su potencia tenía que ser extraordinaria.

Desde entonces, los astrónomos han comprobado que Cygnus A es sólo una galaxia más de las muchas que brillan con una luminosidad un millón de veces mayor que la Vía Láctea. La relación que haya entre los distintos tipos de galaxias activas y la naturaleza del mecanismo que las hace irradiar con tamaña intensidad es un misterio que aún perdura. Sin embargo, durante los últimos veinte años, los astrónomos, observacionales o teóricos, tienden a creer que tan poderosa emisión en radio no es sino una manifestación de los violentos procesos que tienen lugar en las inmediaciones de objetos de grandísima masa que han llegado a la etapa final de un colapso gravitatorio —en otras palabras, cerca de agujeros negros cuya masa es, quizá, mil millones de veces la solar—.

GEORGE K. MILEY y KENNETH C. CHAMBERS se vienen dedicando a la caza de las galaxias remotas desde hace siete años. Miley enseña en la Universidad de Leiden. Tras doctorarse en 1968 por Manchester, se sirvió del gran radiotelescopio de Westerbork para el estudio de fuentes de radio con espectro empinado. Entre 1984 y 1988, trabajó en el Instituto Científico del Telescopio Espacial en Baltimore, donde inició la búsqueda de radiogalaxias distantes, tema que más tarde se convertiría en el proyecto de tesis de Chambers, hoy docente en la Universidad de Hawai en Honolulu.

Gracias a las señales de radio que provienen de las galaxias activas hemos localizado, con ayuda de otros, las galaxias más distantes conocidas. Son tan remotas que su radiación ha tardado miles de millones de años en llegar a la Tierra, y las vemos tal y como eran cuando el universo había recorrido la décima parte de su edad actual, que es de unos 15.000 millones de años. Las galaxias activas más jóvenes difieren de sus parientes más viejas y cercanas en varios aspectos; de ahí que sean tan útiles para saber cómo se forman y evolucionan las galaxias de gran masa.

Que hay una gran diversidad entre las radiogalaxias se puso de manifiesto en cuanto se emprendió la busca de las compañeras visibles de las fuentes de radio enumeradas en el catálogo 3C —el tercero de Cambridge—, compilado a finales de los cincuenta por el grupo de Martin Ryle. Aproximadamente un 70 por ciento de las fuentes del catálogo, entre ellas Cygnus A, aparecen aquí clasificadas como radiogalaxias. La mayoría de estos objetos relativamente cercanos se asemejan bastante a las galaxias elípticas gigantes normales. Durante los últimos años, los astrónomos han observado radiogalaxias alejadísimas, objetos de estructura muy peculiar e irregular.

Sabemos ahora que las radiogalaxias no son sino una parte de la familia de las galaxias activas, que con tan asombrosa potencia irradian. El otro grupo principal de galaxias activas engloba las fuentes de radio puntuales, o cuásares, denominados así porque su apariencia recuerda a la de las estrellas (la palabra cuásar procede de la contracción de la expresión en inglés *quasi-stellar*). A diferencia de las radiogalaxias, los cuásares no se parecen en nada a las galaxias normales; además, al contrario de lo que su nombre indica, un 90 por ciento de los cuásares no emite en longitudes de onda de radio.

En 1963, Maarten Schmidt dedujo, a partir de sus espectros, que los cuásares más brillantes se encuentran mucho más allá de la Vía Láctea. Desde entonces se ha determinado que los cuásares son las pequeñas y brillantes regiones centrales de galaxias distantes cuyas partes externas resultan difíciles de detectar debido al brillo tan intenso de sus centros. El parecido de los cuásares con las estrellas no nos debe engañar: los cuásares están entre los objetos más luminosos del universo.

Algunas galaxias exhiben formas de actividad menos extremas. Por ejemplo, los centros, también brillantes, de las galaxias de Seyfert son algo así como cuásares domesticados, sin que dejen de percibirse los cuerpos de las galaxias espirales que rodean dichos centros. La verdad es que los astrónomos empiezan a reconocer que la línea que separa a las galaxias activas de las ostensiblemente normales es mucho más imprecisa de lo que se creía. Las regio-

1. LA GALAXIA MAS LEJANA que conocemos es 4C 41.17. Dista unos 12.000 millones de años luz de la Tierra. Esta imagen en color falso fue tomada por el Telescopio Espacial Hubble. La morfología irregular de la galaxia difiere de la forma suave y elíptica de la mayoría de las galaxias cercanas que emiten en longitudes de onda de radio. Las líneas de contorno representan las intensas emanaciones de radio de 4C 41.17. Se discute por qué la forma de la radiofuente que circunda las radiogalaxias remotas se alinea con su apariencia en el visible.

Escala de distancias del Universo

0 — DIEZ MIL MILLONES DE KILOMETROS — CIEN MIL MILLONES — UN BILLON — DIEZ BILLONES

TIERRA SOL NEPTUNO ← COMETAS →

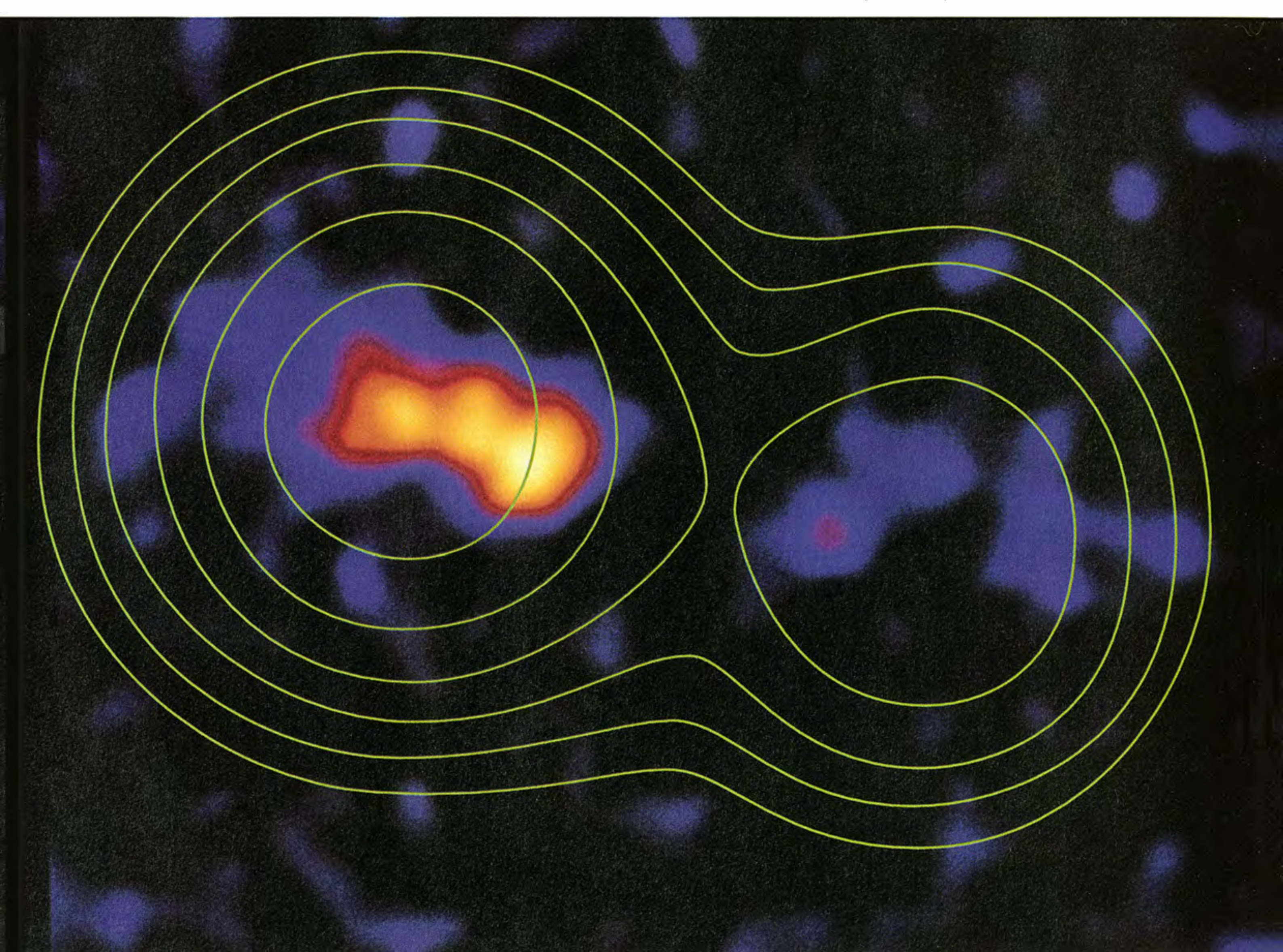
nes centrales de muchas galaxias dotadas de gran masa, tal vez la mayoría de ellas, contienen fuentes de radio y una concentración alta de luz.

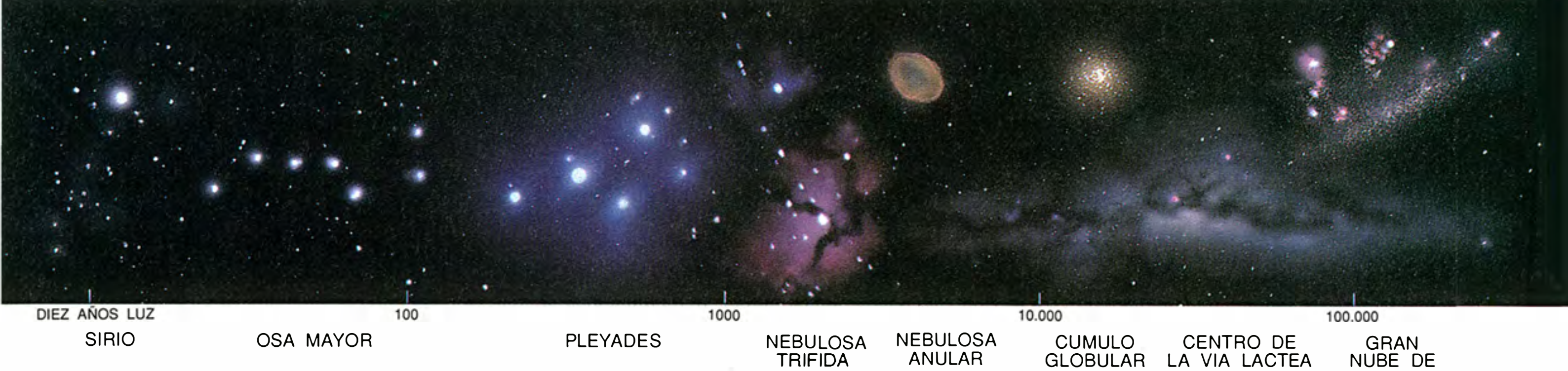
Con la aplicación de la radiointerferometría, se ha demostrado que muchos tipos de galaxias activas tienen en las longitudes de onda de radio una misma estructura. La interferometría se lleva a cabo gracias a una conexión de dos o más telescopios que crea, en esencia, un solo instrumento más preciso. Dispuestos así, los radiotelescopios ofrecen imágenes mucho más nítidas que las producidas incluso por los mayores telescopios ópticos.

La interferometría ha ido revelando que las radiogalaxias y los cuásares normalmente tienen dos lóbulos simétricos y radioemisores, que flanquean y hacen parecer menores a sus galaxias progenitoras. Las fuentes mayores se extienden más de 10 millones de años luz a lo ancho, es decir, más de 20 veces la extensión visible de la galaxia anfitriona típica y más de 100 veces el diámetro de la Vía Láctea. De la naturaleza de su emisión en radio se desprende que ésta es producida por electrones que, a su paso por un campo magnético, viajan a velocidades cercanas a la de la luz.

En 1971, Martin J. Rees, de Cambridge, sugirió que la energía que activa los gigantescos lóbulos de radio era generada por motores ocultos en los núcleos de las galaxias progenitoras. Rees y Roger D. Blandford propusieron que el transporte de la energía correspondía a partículas de alta velocidad, lanzadas por canales estrechos. Unos años más tarde, otros mostraron que en muchas fuentes había estructuras similares a chorros; conectaban, al parecer, un nódulo, brillante en las longitudes de onda de radio, del núcleo de la galaxia con brotes de radioemisión que emanaban de las partes más externas de los lóbulos. Se cree que los chorros marcan el camino a las partículas subatómicas que salen del núcleo.

La naturaleza del motor que impulsa los violentos procesos de radiogalaxias y cuásares es todavía un





misterio, si bien se acepta que habría detrás de todo ello un inmenso agujero negro en rotación. La teoría de la relatividad de Einstein predice la existencia de objetos cuya gravedad es tan poderosa que nada, ni siquiera la luz, puede escapar de su interior. Los astrónomos siguen buscando pruebas observacionales de su existencia.

Según reza la teoría, la materia que cae en espiral hacia una agujero negro se comprime y calienta hasta alcanzar, antes de desaparecer en su interior, una temperatura de millones de grados. Los fenómenos extraños que tienen lugar en los centros de las galaxias activas o alrededor de los mismos, como la formación de chorros de radio, se atribuyen a las partículas extraordinariamente calientes que giran en torno al agujero negro. A tenor de las apariencias, los chorros constan de haces colimados de partículas expulsadas a lo largo del eje de rotación del agujero por una suerte de proceso electromagnético de dinamo.

Gracias a los avances registrados, empieza a haber un esquema unificado de los diferentes tipos de galaxias activas. Se cree que uno de los factores que más contribuyen a determinar el aspecto ofrecido por las galaxias activas es la orientación del chorro de radio; en particular, si el chorro apunta o no en dirección a la Tierra.

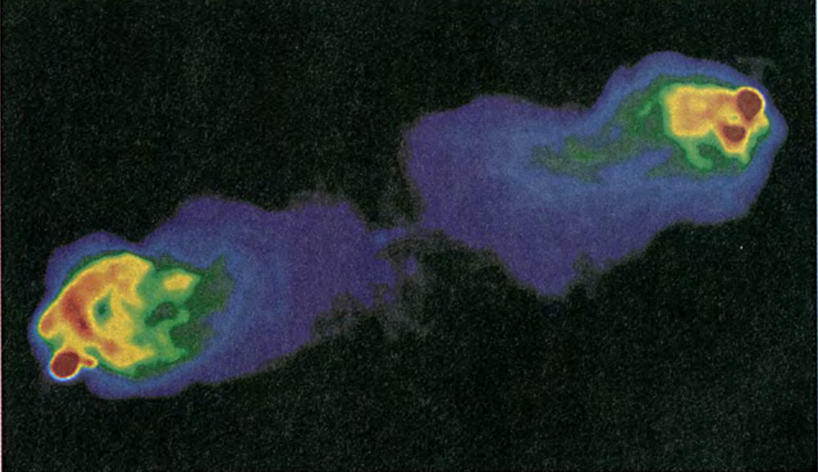
Varias observaciones realizadas durante los últimos años sugieren que la existencia de polvo en la región central de una galaxia activa impide el paso a toda radiación, excepto la emitida a lo largo del eje del chorro de radio. Durante su estancia en el Caltech, Peter D. Barthel propuso que todas las galaxias con emisión de radio contenían núcleos brillantes. Si la radiofuente apunta hacia la Tierra, el núcleo resulta visible y se considera que el objeto es un cuásar; si la radiofuente está alineada en otra dirección cualquiera, lo más probable es que el núcleo permanezca oculto, en cuyo caso será tomada por una radiogalaxia.

La naturaleza del entorno local que rodea la radiofuente probablemente influye en las propiedades que se han observado de las galaxias con emisión de radio. Si los chorros se topan con regiones muy densas de partículas de polvo y gas, no podrán propagarse hacia afuera, ni la galaxia desarrollará sus potentes radiolóbulos. Factores ambientales como éstos podrían explicar por qué las radiofuentes más luminosas se forman alrededor de galaxias elípticas gigantes y de galaxias espirales ricas en gas —la Vía Láctea es una de éstas—.

El paso del tiempo debe también dejar su huella en la naturaleza de una galaxia activa. Las variaciones en el grado de actividad u orientación del agujero negro central alterarán la luminosidad y el aspecto de la fuente de radio. Las emisiones ópticas y en radio de las regiones internas de las galaxias activas fluctúan en intensidad de año en año; está claro que las condiciones reinantes cerca del agujero pueden cambiar con bastante rapidez. A lo largo de millones de años, el agujero negro aumentará paulatinamente su masa, y podría llegar a vaciar la región cercana de materia, con lo que cesaría toda actividad.

El descubrimiento de otras galaxias activas ha motivado que los astrónomos se percataran de cuán drásticamente ha cambiado la población





2. CYGNUS A, una de las radiogalaxias más cercanas y brillantes, se halla a unos 650 millones de años luz de distancia. Una imagen óptica compuesta nueva, tomada a distintas longitudes de onda (*izquierda*), descubre una banda oscura, no detectada anteriormente, cerca del centro de la galaxia; se trata, posiblemente, de los restos de la reciente fusión con una galaxia más pequeña. Los enormes y filamentosos lóbulos que emiten en longitudes de onda de radio (*derecha*) tienen un ancho de 400.000 años luz, varias veces el diámetro de la parte visible de la galaxia. Se piensa que los lóbulos son activados por unos chorros de partículas gemelos que se mueven a alta velocidad, disparados a lo largo del eje de rotación de un agujero negro que se encuentra en el centro de Cygnus A.



de estos objetos durante la historia del universo. A grandes distancias, donde vemos el universo tal y como era hace miles de millones de años, los cuásares abundan mucho más que en lugares cercanos. Escrutinios recientes indican que dos mil millones de años después de la gran explosión ("big bang"), la densidad de cuásares brillantes y otras galaxias activas superaba, cientos de veces, la actual. Muchos investigadores suponen que la época en que los cuásares eran más comunes está relacionada con la formación de galaxias, pero no se ha establecido ningún vínculo directo. Por medio del estudio de las radiogalaxias más jóvenes y distantes, esperamos investigar esa relación y descubrir indicios sobre los primeros tiempos del universo.

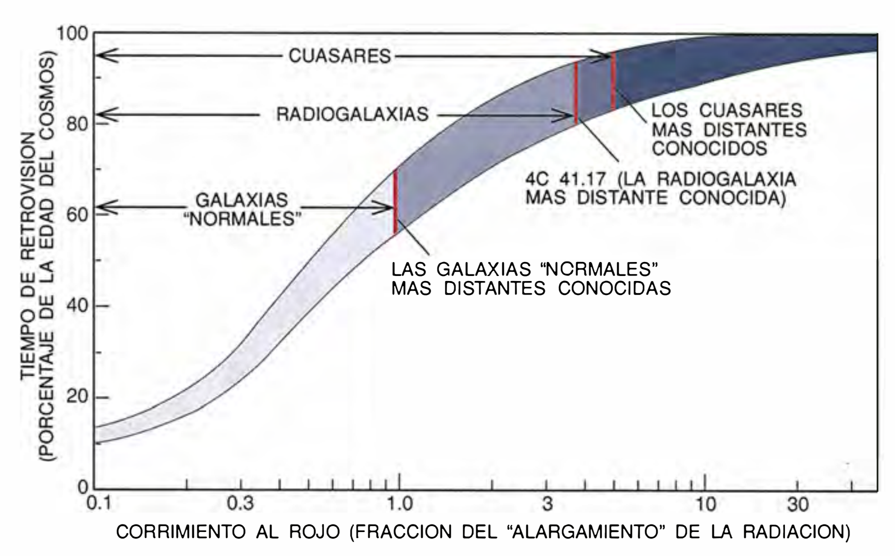
Antes de analizar qué aconteció en galaxias remotas, debemos presentar algunas nociones fundamentales. Las medidas de distancia en el universo se basan en que los átomos de cada elemento químico emiten o absorben luz de ciertos colores —longitudes de onda— característicos sólo, que aparecen en los espectros en forma de líneas brillantes u oscuras. En 1929, Edwin P. Hubble anunció que, en los espectros de la mayoría de las galaxias, las líneas espectrales propias del hidrógeno, el calcio y otros elementos tienen un color más rojo (una mayor longitud de onda) que cuando se las genera en el laboratorio. La causa de este efecto de corrimiento hacia el rojo es la expansión global del universo, que enrojece, o "alarga", la luz. Cuanto más allá miremos, mayor será la expansión ocurrida y por tanto mayor será también el desplazamiento hacia el rojo.

El cociente entre el desplazamiento de la longitud de onda y la longitud de onda se denomina z. Se mide hoy el corrimiento hacia el rojo de una galaxia, débil incluso, con una precisión de hasta una fracción de un 1 por ciento. Si conociéramos el ritmo preciso de la expansión cósmica y la verdadera geometría del universo, podríamos determinar con exactitud similar la distancia hasta la galaxia e inferir, por tanto, su tamaño y el tiempo transcurrido desde que la luz salió de la misma.

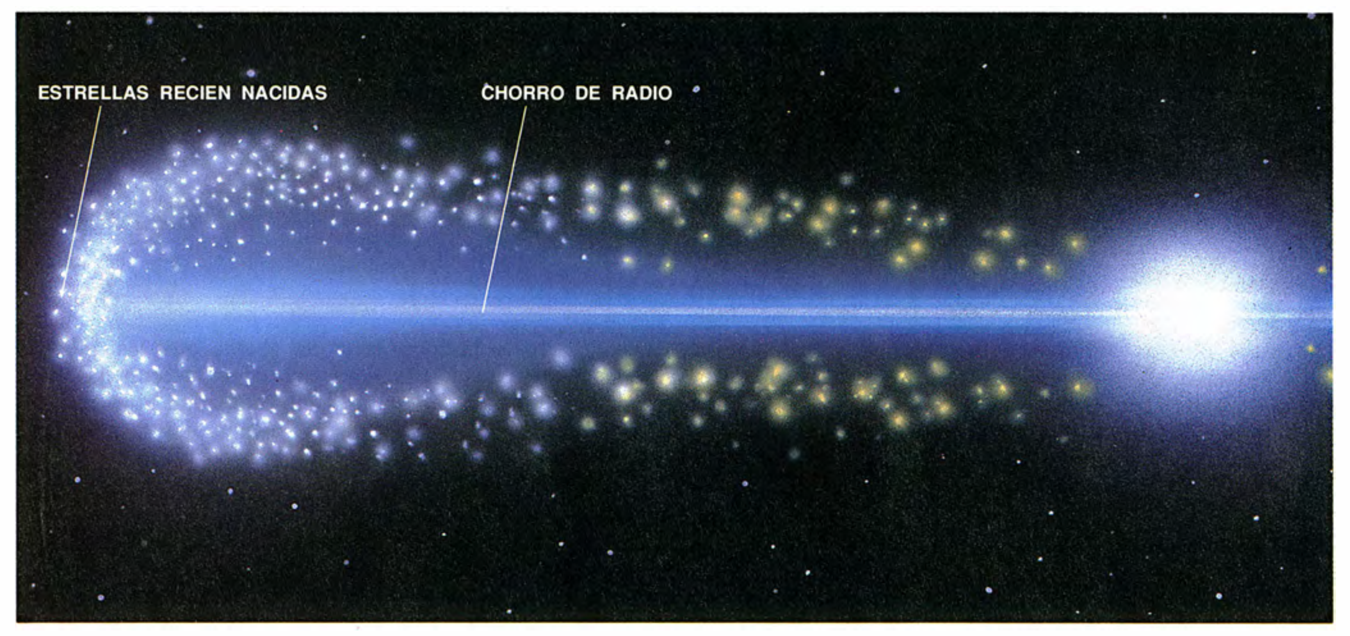
Pero nuestro conocimiento del tamaño y la edad del universo se mueve en un margen de error cifrado en un factor dos, razón por la cual se prefiere hablar de la distancia a la que yace un objeto conforme a su corrimiento hacia el rojo, y no de su distancia en años luz. Suponiendo que la edad del universo sea de 15.000 millones de años y que su densidad coincida con la prevista en los modelos cosmológicos más aceptados, veremos una galaxia cuyo corrimiento al rojo sea de 2 tal y como era cuando el universo contaba la quinta parte de su edad actual —lo que viene a ser una distancia de unos doce mil millones de años luz—, y, si fuese de 4, como cuando contaba sólo un décimo de la misma.

El estudio de radiogalaxias tan lejanas proporciona un modo de conocer qué pasó durante los momentos subsiguientes al nacimiento del universo. Se acepta que las galaxias crecieron alrededor de pequeñas fluctuaciones de densidad que surgieron antes de que hubiesen transcurrido 10^{-32} segundos después de la gran explosión inicial. Según la teoría actual, la mayor parte de la masa del universo existe en forma de partículas exóticas que constituyen la materia oscura fría. Estas partículas sólo interaccionan con la materia normal por mediación de la gravedad, así que pudieron agregarse entre sí poco después de la gran explosión, cuando la materia normal estaba aún demasiado caliente para que pudiera hacer lo mismo. A medida que se enfrió el universo, la materia normal fue cayendo en los grumos de materia oscura, y de ahí, finalmente, se formaron las galaxias.

De acuerdo con la versión más simple del modelo de materia oscura fría, las galaxias se habrían fusionado tan lentamente que sólo unas pocas se habrían constituido en corrimientos hacia el rojo mayores de 2 o 3 —es decir, formadas en el



3. ESTRECHA RELACION entre el corrimiento hacia el rojo y la distancia en virtud de la expansión del universo. Cuanto más lejos se encuentre un objeto, más se corre al rojo su luz. En este gráfico la distancia se representa respecto al tiempo relativo de retrovisión, es decir, el tiempo que ha tardado la luz en viajar desde un objeto hasta la Tierra dividido por el tiempo transcurrido desde la gran explosión. Las radiogalaxias y los cuásares tienen líneas de emisión brillantes cuyos desplazamientos al rojo llegan a estar entre 4 y 5, cuando el universo sólo contaba una décima parte de su edad actual.



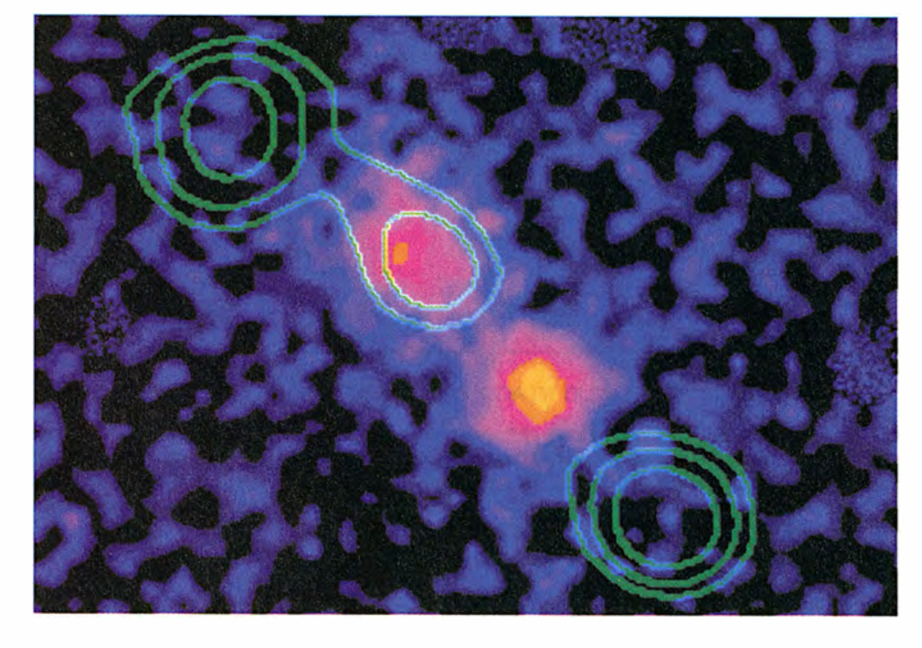
4. ALINEACION de las componentes ópticas y de radio de las radiogalaxias, atribuible quizás a una formación extraordinaria de estrellas. Un chorro bilateral de partículas rápidas generado en la región central se propaga hacia el exterior a través del gas interestelar e intergaláctico. A medida que el frente del chorro se abre camino, se producen choques que aceleran los electrones hasta velocidades cercanas a la de la luz; los electrones emitirán radioondas al atravesar el campo magnético local. El gas que comprime el choque forma, al enfriarse, cúmulos estelares que se diseminan a lo largo de la fuente de radio.

primer par de miles de millones de años tras la gran explosión—. Por tanto, el análisis de las galaxias de esa época, o incluso de épocas anteriores, reviste interés crucial para determinar qué modelos cosmológicos son prometedores y cuáles hay que descartar.

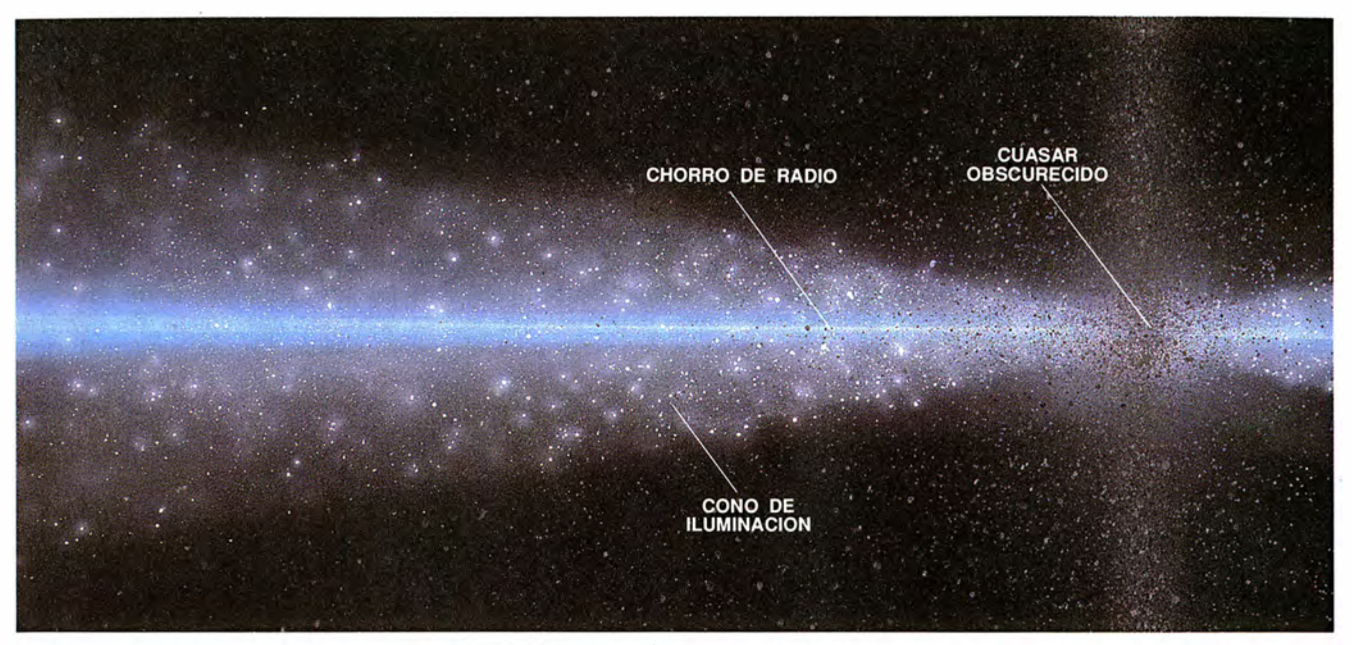
La potente, y fácilmente detectable, emisión de radio producida por los cuásares y las radiogalaxias ofrece una herramienta eficaz —y de momento única— para localizar galaxias cuyos corrimientos hacia el rojo sean de 2 o más. En los últimos años los detectores de luz que incorporan dispositivos de carga acoplada, o DCA, han revolucionado esta línea de investigación al permitir a los astrónomos captar imágenes de galaxias mucho más débiles que las hasta entonces detectables y realizar medidas espectroscópicas de su corrimiento hacia el rojo.

Durante los años setenta, antes de que se pudiera disponer de los DCA, Hyron Spinrad y su equipo de Berkeley rastrearon las galaxias visibles asociadas a las fuentes enumeradas en el catálogo 3C. Descubrieron así las primeras galaxias conocidas con desplazamientos hacia el rojo mayores que 1. Una de ellas tenía un corrimiento de 1,8; ello le valió durante algún tiempo el título de galaxia observada más remota.

No sería práctico realizar observaciones de alta sensibilidad en el dominio óptico, tan gravosas en tiempo, de las decenas de miles de fuentes de radio débiles que se conocen. Durante los últimos años se han utilizado numerosos métodos para seleccionar los mejores y más distantes candidatos. Patrick J. McCarthy, de los Observatorios Carnegie en Pasadena, en colaboración con Spinrad y Willem J. M. van Breugel, del Laboratorio Lawrence en Livermore, han encontrado varias galaxias con desplazamientos hacia el rojo mayores que 2 por medio del análisis de fuentes de radio que no cuentan con una galaxia óptica asociada. En una línea similar, Simon J. Lilly, de la Universidad de Toronto, midió los colores ópticos de los tenues objetos asociados a la muestra "1 Jansky", una lista de radiofuentes débiles (varias veces más débiles que las que figuran en el catálogo 3C) compilada gracias a un radiotelescopio instalado en Bolonia. En 1988, Lilly



5. RADIOGALAXIAS REMOTAS. Exhiben con mayor nitidez el efecto de alineación que las galaxias más próximas. Estas dos galaxias (*izquierda y página siguiente*), dos de las rastreadas recientemente por los autores y sus colaboradores, tienen corrimientos hacia el rojo de



6. UN MODELO DISTINTO propone que la alineación radioóptica observada tiene su origen en radiación que los electrones o las partículas de polvo dispersan. En este modelo, la radiogalaxia contiene un cuásar brillante en buena medida oculto por un velo de polvo. La luz del cuásar sólo escapa por el eje del chorro en radio. Ese cono de luz ilumina la materia —electrones o polvo—, que la dispersa y polariza. Debido a que la luz sale por la dirección del chorro, el observador contempla la parte visible de la galaxia que está orientada en el mismo ángulo que la fuente de radio.

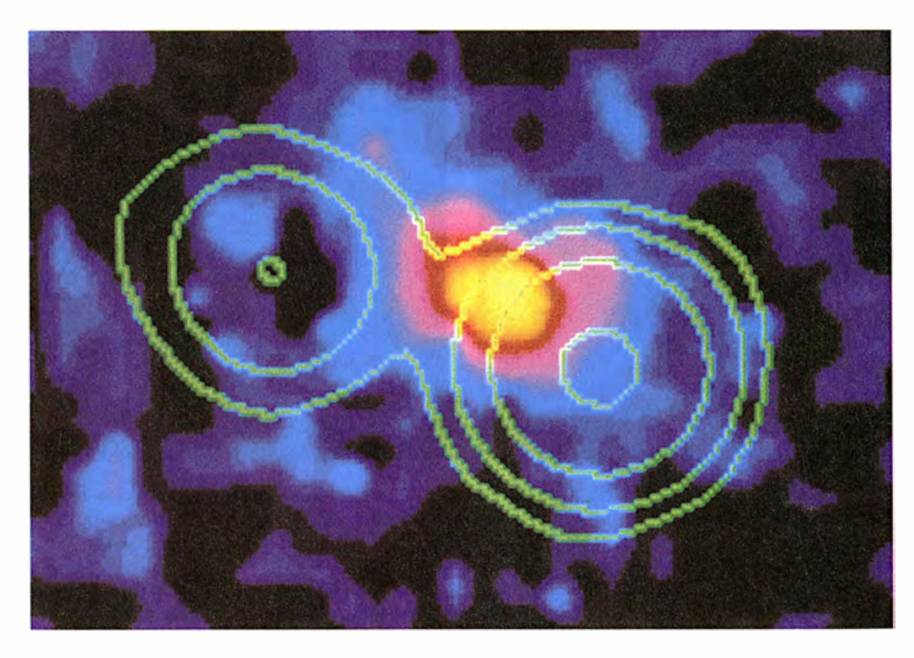
anunció el descubrimiento de una radiogalaxia con un desplazamiento al rojo de 3.

Sin embargo, la naturaleza nos ofrece otro método para identificar galaxias distantes que ha demostrado ser más eficaz, un método basado únicamente en sus propiedades a longitudes de onda de radio. La pendiente espectral, o color, de la emisión de radio de una galaxia activa guarda una estrecha correlación con su distancia. Los objetos más remotos producen los espectros de radio más empinados —es decir, cuyo brillo decae más rápidamente de las frecuencias bajas a las altas—. Aunque no se ignora el motivo de que haya correlación entre el espectro de radio y la distancia, semejante hecho sirve de base empírica a un método muy eficaz de búsqueda.

Explotamos esa correlación hace ya ocho años, cuando empezamos a concentrar nuestro esfuerzo en las galaxias visibles asociadas a radiofuentes cuyos espectros tenían una pendiente acusada. Entre los primeros objetos que examinamos, y uno de los más fascinantes también, cabe mencionar a 4C 41.17, cuyo nombre proviene del cuarto catálogo de Cambridge de fuentes de radio. Identificamos la galaxia hospedadora conectada con la fuente de radio, y determinamos que su corrimiento hacia el rojo era de 3,8. Esta fuente es por ahora la galaxia más distante que se conoce.

Animados por este éxito, continuamos nuestras observaciones en colaboración con Huub Röttgering y Rob van Ojik, de Leiden, y con varios otros astrónomos. El trabajo progresa a pasos agigantados. Antes de embarcarnos en este proyecto, no se conocía ni una sola galaxia cuyo corrimiento hacia el rojo fuese mayor que 2. Hasta ahora, nuestro proyecto ha descubierto unas 35 galaxias con desplazamientos que superan esa magnitud; el número total de galaxias conocidas que lo hacen asciende a más de 60. Al mostrar cómo las radiogalaxias distantes y jóvenes se diferencian de las maduras y cercanas a la Tierra, nuestra investigación nos está llevando a descubrir algunos detalles de la evolución galáctica.

Una propiedad extraordinaria de las galaxias elípticas gigantes (las que hospedan las fuentes de radio



aproximadamente 2,5 (*izquierda*) y 2,9 (*derecha*). Las líneas de color verde muestran los contornos de la emisión en radio; las imágenes ópticas en color falso fueron tomadas con el Telescopio de Nueva Tecnología del Observatorio Europeo del Sur, en Chile.

más brillantes) es la uniformidad de su luminosidad infrarroja. En 1984, Lilly y Malcolm S. Longair observaron en el infrarrojo radiogalaxias del catálogo 3C con el telescopio de infrarrojos del Reino Unido en Hawai. Elaboraron a continuación un gráfico del corrimiento hacia el rojo respecto al brillo infrarrojo para corrimientos de hasta 1,5. El gráfico resultante exhibía un dibujo lineal, casi plano, que indicaba que la luminosidad infrarroja intrínseca de las radiogalaxias varía muy poco con el espacio o el tiempo.

Cuando se realizaron esas observaciones, se atribuía la emisión en infrarrojos de las galaxias elípticas gigantes a estrellas de edades de al menos unos cuantos miles de millones de años. Considerábase que las radiogalaxias alojaban una población notable de estrellas maduras, cuyas propiedades globales eran bastante uniformes. Lilly y Longair esperaban, pues, que las radiogalaxias sirvieran de lámparas de referencia, es decir, de objetos cuyas luminosidades absolutas son conocidas y cuyo brillo aparente permite medir con precisión el tamaño, la edad y la geometría del universo.

El refinamiento de la observación ha revelado que las cosas no son tan sencillas. Hace diez años, la mayoría de los investigadores opinaba que la emisión era herramienta útil para encontrar galaxias distantes, sin relación alguna con las propiedades ópticas de los objetos. Pero ese supuesto, que se basaba en que las galaxias elípticas cercanas tienen el mismo aspecto sean o no potentes fuentes de radio, ha resultado ser incorrecto. Nuevas imágenes, obtenidas con DCA, de las radiogalaxias más distantes muestran que éstas, lejos de ser estables y uniformes, son grumosas y alargadas.

Las imágenes condujeron a un descubrimiento inesperado y emocionante. Hará unos seis años, un grupo de Berkeley y nosotros descubrimos, por vías independientes, que el eje de radioemisión de las galaxias se alinea con los perfiles que se perciben cuando se las observa en el continuo óptico (es decir, en toda la banda de luz visible y no sólo en ciertas líneas de emisión). Este efecto empieza a dejarse percibir en algunas radiogalaxias con desplazamientos hacia el rojo de 0,5; a desplazamientos de 1 o mayores, las morfologías de radio y ópticas de la mayoría de estos sistemas se hallan más o menos alineadas. Las radiogalaxias cercanas, por contra, no muestran ningún fenómeno parecido.

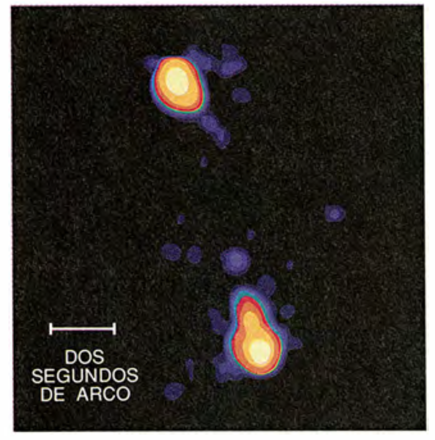
Para desdicha de los cosmólogos, las alineaciones radioópticas observadas minan el uso de las radiogalaxias como lámparas de referencia. La correlación entre el grado de alineación y el corrimiento hacia el rojo de la galaxia nos dice que la naturaleza de la luz que proviene de una radiogalaxia depende mucho de la distancia a que esté. Además, los astrónomos no pueden suponer todavía que las fuentes que seleccionan por la intensidad de su emisión de radio son, en lo demás, galaxias normales. Sólo cuando se entienda el fenómeno de la alineación tendremos fundadas esperanzas de distinguir, de las variaciones reales producidas por la evolución, las distorsiones ópticas causadas por la geometría del universo.

Se han propuesto dos hipótesis principales para explicar el origen de la morfología alargada de estas galaxias. Según la primera, el chorro que la fuente de radio impulsa fomenta a su paso la creación de un número enorme de estrellas; la otra sostiene que el polvo dispersa radiación proveniente de una fuente central de energía, brillante aunque velada. Si la hipótesis primera es correcta, la emisión óptica sería luz que emana de estrellas recién nacidas. Uno de nosotros (Chambers), junto con Stephane Charlot, ha demostrado que un período de creación extraordinaria de estrellas de unos cientos de millones de años podría, en efecto, explicar los colores óptico e infrarrojo de las radiogalaxias con grandes corrimientos hacia el rojo. Tales edades son también admisibles para las fuentes de radio.

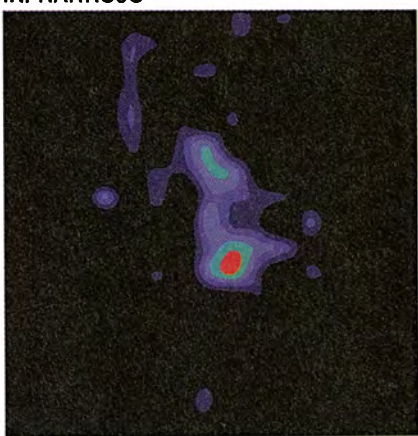
El trabajo teórico desarrollado por Rees, de Cambridge, Begelman, de la Universidad de Colorado, y Denis F. Cioffi, de la NASA, refuerza la hipótesis estelar. El choque producido por el chorro de radio, predicen, comprimiría las nubes de gas que rodean la galaxia, y su contracción terminaría por convertirlas en estrellas. David S. De Young, de Kitt Peak, realizó simulaciones por ordenador de colisiones entre chorros en radio y nubes. Sus resultados confirman la verosimilitud de tal marco hipotético.

El estudio de radiofuentes presta respaldo observacional a la idea de que los chorros inducen la formación de estrellas. Aunque la fuente de radio no suele alterar el aspecto óptico de las radiogalaxias cercanas, tenemos indicios que muestran que los chorros sí perturban la materia interestelar de las galaxias. Timothy

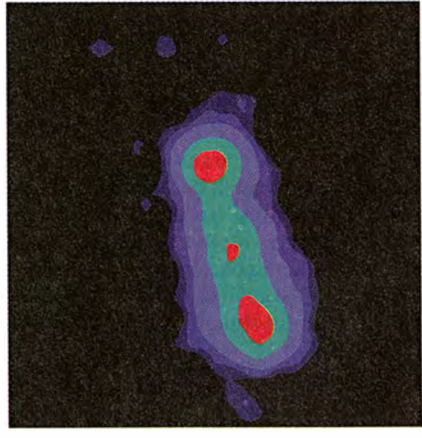
RADIO



INFRARROJO



ULTRAVIOLETA



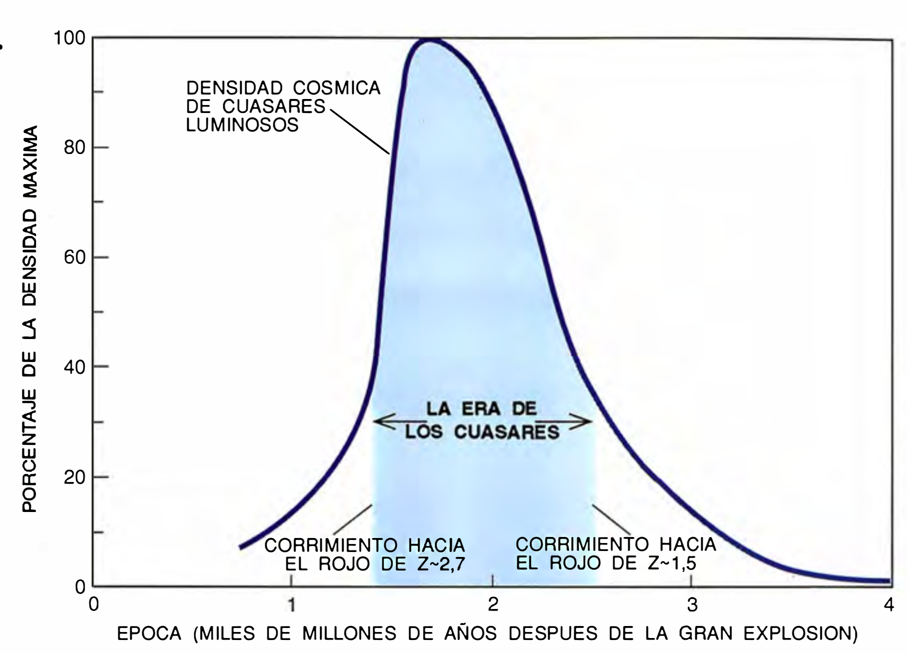
7. DIFERENTES LONGITUDES DE ONDA manifiestan rasgos sutilmente distintos de la brillante radiogalaxia 3C 368. El color falso denota la intensidad de la radiación, de baja (*azul oscuro*) a alta (*amarillo claro*). La emisión de radio (*izquierda*) es generada por electrones que se desplazan a altas velocidades a través del campo magnético de la galaxia. Se aprecia la estructura bilobular. La imagen en infrarrojo (*centro*) muestra radiación que emiten estrellas y gas del cuerpo de la galaxia. A la derecha se representan rayos ultravioletas de 3727 angstroms de longitud de onda que provienen de átomos de oxígeno ionizados (*derecha*). Nótese que las tres imágenes tienen orientaciones similares.

M. Heckman, de la Universidad Johns Hopkins, van Breugel y uno de nosotros (Miley) observaron, con el telescopio Mayall de Kitt Peak, nubes de gas ionizado situadas a lo largo de las fuentes de radio de radiogalaxias cercanas. Tal hallazgo sugiere que los chorros de radio interactúan intensamente con el gas de estos sistemas. Cierta galaxia con emisión de radio, el objeto Minkowski, muestra lo que parece ser una galaxia enana reciente, ubicada en un recodo del chorro.

La observación de la polarización óptica (el grado en que las ondas de luz se orientan preferentemente en una dirección dada) de 3C 368 y de varias otras radiogalaxias brillantes y alineadas sugirió una explicación distinta de la alineación radioóptica. Un grupo dirigido por Spirello di Serego Alighieri, Robert A. Fosbury y Clive N. Tadhunter, del Observatorio Europeo del Sur, y Peter J. Quinn, del Observatorio de monte Stromlo, estudió 3C 368 mediante un telescopio instalado en Chile; Michael Scarrott y C.D. Rolph, de la Universidad de Durham, y Tadhunter prosiguieron la observación con el telescopio William Herschel del Observatorio del Roque de Los Muchachos, en la isla de La Palma. Se halló que la luz que emana de 3C 368 está muy polarizada.

Manera fácil de polarizar la luz es dispersarla. Por ello, Tadhunter y su equipo, e independientemente Andrew C. Fabian, de Cambridge, defendieron que parte de la luz de las radiogalaxias lejanas consiste en la emisión de luz dispersada procedente de un cuásar oculto en el núcleo galáctico. Dado que la radiación del cuásar es absorbida en todas las direcciones, salvo a lo largo del eje de radio, no se la puede ver directamente. Sin embargo, como un reflector que atraviesa la niebla, el haz del cuásar es dispersado por los electrones o partículas de polvo que encuentra en su camino; así se hace visible a la observación terrestre. La luz dispersada aparecerá, y de esa manera se hace visible a los observadores terrestres, alineado a lo largo del radiochorro.

Ni la eclosión de estrellas ni los modelos de dispersión justifican todos los rasgos de las radiogalaxias distantes. Que haya polarización significa que parte de la luz tiene que haber sido dispersada. Sin embargo, los electrones dispersan por igual todas las longitudes de onda; cabría entonces esperar que la luz difundida tuviese el mismo espectro que un cuásar, pero no es así. El polvo dispersa mejor la luz azul que la roja, y podrían debérsele, pues, los fuertes gradientes de color observados. Ahora bien, se sabe que las emisiones de radio y de infrarrojo de algunas radiogalaxias están alineadas, y un modelo de polvo difícilmente podría producir tanta dispersión en el infrarrojo como para dar cuenta de este efecto. En cualquier caso, el polvo está hecho de elementos pesados que sólo se forman en el interior de las estrellas; luego, para que haya polvo, tienen que haberse formado antes estrellas a lo largo del eje de radio. Parece, pues, que lo más probable es que se combinen los dos mecanismos, el de formación estelar y el de dispersión.



8. CONCENTRACION DE CUASARES Y RADIOGALAXIAS, mil veces superior a la actual cuando el universo tenía unos dos mil millones de años. La razón del rápido crecimiento y posterior declive de la población de galaxias activas es un misterio que quizás encierre la clave de la formación y desarrollo inicial de las galaxias de gran masa.

El año pasado, en colaboración con van Breugel y F. Duccio Macchetto, del Instituto Científico del Telescopio Espacial, observamos 4C 41.17 con el Telescopio Espacial Hubble. La resolución angular de la imagen que este instrumento nos proporcionó es unas diez veces mayor que la de la fotografía tomada anteriormente desde tierra, y muestra con nitidez que la región interior de esta galaxia tiene una forma irregular y grumosa. Los grumos podrían ser nubes de gas iluminadas por un cuásar central o cúmulos estelares gigantes en proceso de fusión. El examen del espectro de 4C 41.17 podría determinar cuál de estas explicaciones es la correcta y descubriríamos el mecanismo que produce las alineaciones radioópticas.

Además, el análisis espectral de radiogalaxias remotas permite la observación de cualquier cosa que se encuentre en la línea de visión entre aquéllas y la Tierra. Por ejemplo, nubes de gas u otras galaxias interpuestas harán que en el espectro de la radiogalaxia aparezcan líneas de absorción, que informarán sobre los objetos interpuestos. A diferencia de los cuásares, las radiogalaxias son espacialmente extensas; sirven, pues, para investigar líneas de visión separadas por unas cuantas centésimas de grado.

Igual que la extinción de los dinosaurios, el rápido declive de la población de galaxias activas con el envejecimiento del universo denuncia que hubo que producirse un cambio drástico en el medio cósmico. Un catálogo más extenso podrá quizás aclarar qué proceso acabó con estas especies celestes.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DISTANT GALAXIES. G. K. Miley en *Proceedings of the ST-ECF/STSCI Workshop on Science with the Hubble Space Telescope: ESO Conference and Workshop Proceedings*, n.º 44, dirigido por P. Benvenuti y E. Schreier, European Southern Observatory, 1992.

HUBBLE SPACE TELESCOPE IMAGING OF DISTANT GALAXIES: 4C 41.17 AT Z = 3.8. G. K. Miley, K. C. Chambers, W. J. M. van Breugel y F. Macchetto en *Astrophysical Journal*, vol. 401, n.º 2, parte 2, páginas L69-L73; 20 de diciembre de 1992.

El centrosoma

Por dirigir el ensamblaje del esqueleto de la célula, este orgánulo controla la división, motilidad y forma de la misma. La biología comienza a entender los pormenores de su estructura y de su función

David M. Glover, Cayetano González y Jordan W. Raff

El citoplasma ocupa el interior de la célula. Pero no es ningún medio amorfo donde flotan los orgánulos. Se trata, por el contrario, de un esqueleto de fibras proteicas y moléculas accesorias que, a modo de andamiaje dinámico, sirve de apoyo para las múltiples modificaciones, externas e internas, que experimenta la célula en el curso de su existencia. Apenas conocemos la organización de ese citoesqueleto y las funciones que cumple, lo que sí sabemos es que el centrosoma desempeña un papel fundamental en ese tipo de procesos.

La estructura centrosómica carece de una figura definida. De ella irradian los microtúbulos, uno de los principales elementos del citoesqueleto. Los microtúbulos parecen, a su vez, influir en la distribución de los filamentos intermedios y los menores de actina, las otras fibras proteicas principales que intervienen en dicho armazón celular. El centrosoma dirige, pues, cual hábil arquitecto, el proyecto citoesquelético. A través de su influencia sobre la compleja red de fibras, el centrosoma controla la forma, polaridad y movimiento de las células, amén del transporte de materiales por su interior. Durante la división celular, toma a su cargo la organización del huso mitótico, la estructura celular que reparte los cromosomas entre las células hijas.

No obstante su importancia, el centrosoma constituía hasta hace poco un enigma. Gracias al desarrollo de la biología molecular conocemos ya cuáles son sus componentes fundamentales y las propiedades que los definen. Tal vez estemos a punto de hallar la respuesta que resuelva cuestiones básicas que han venido intrigando a los citólogos desde hace más de un siglo y que conciernen a la división, diferenciación y movimiento de las células.

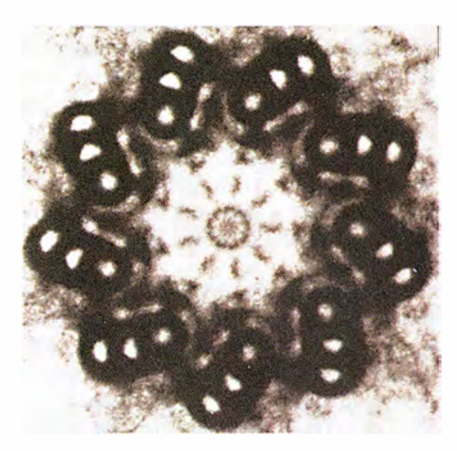
DAVID M. GLOVER, CAYETANO GONZALEZ y JORDAN W. RAFF han contribuido a una mejor comprensión de la estructura del centrosoma. Glover es profesor de genética molecular y director del grupo especializado en ciclo celular del Instituto de Ciencias Médicas de la Universidad de Dundee; inició su formación en la Universidad de Cambridge y se doctoró por la de Londres en 1972. González, ayudante de investigación en Dundee, estudió en la Universidad Autónoma de Madrid. Raff trabaja en el departamento de bioquímica y biofísica de la Universidad de California en San Francisco.

En 1887, y en trabajos distintos, Theodor H. Boveri y Edouard Joseph Louis-Marie van Beneden describían los centrosomas. Investigaban la división celular en los huevos del gusano *Ascaris*. Durante la mitosis, cuando una célula se divide, los dos conjuntos de cromosomas producidos por la replicación del ADN celular se reparten por igual entre las dos células hijas; durante ese proceso, el huso mitótico ejerce una función esencial. Se denomina profase a la parte de la mitosis en la que los cromosomas replicados se condensan; metafase, aquella en la que los cromosomas se alinean a lo largo del ecuador del huso, y anafase, el momento de la mitosis en que los juegos de cromosomas se trasladan hacia polos antagónicos del huso.

Ambos, Boveri y van Beneden, observaron que el huso mitótico parecía extenderse a partir de dos estructuras puntiformes, una en cada polo del huso; las llamaron corpúsculos polares o centrosomas. Mientras la célula no se divide, podemos apreciar la presencia de un centrosoma junto al núcleo. Pero, en cuanto arranca la división, el centrosoma se desdobla y comienza a distanciarse. Los centrosomas gemelos se convierten en centros de organización de las estructuras microtubulares que irradian de cada polo del huso. La separación de los centrosomas, que tiene lugar sólo durante el ciclo mitótico, asegura que los cromosomas replicados se repartan por igual entre las dos células hijas.

Al doblar el siglo se había denunciado ya la presencia de centrosomas en múltiples especies. Observados al microscopio óptico, el aspecto de estos orgánulos difería bastante de un tipo celular a otro. Se le dieron nombres variadísimos: centriolo, corpúsculo central, centro de división, cuerpo central, centro mitótico y centrosfera.

Para enredar más la confusión, vióse que las plantas superiores y ciertos eucariotas inferiores parecían carecer por completo de centrosomas, lo que se interpretó como una señal de que éstos no constituían parte imprescindible del aparato mitótico. Todavía en los años treinta había quien los consideraba meros artefactos de las preparaciones para la observación microscópica; otros opinaban que su presencia en los polos del huso eran



1. ESTRUCTURA DEL CENTROSOMA. Hubo que esperar al advenimiento de la microscopía electrónica para observarla, aun cuando la existencia de este orgánu-

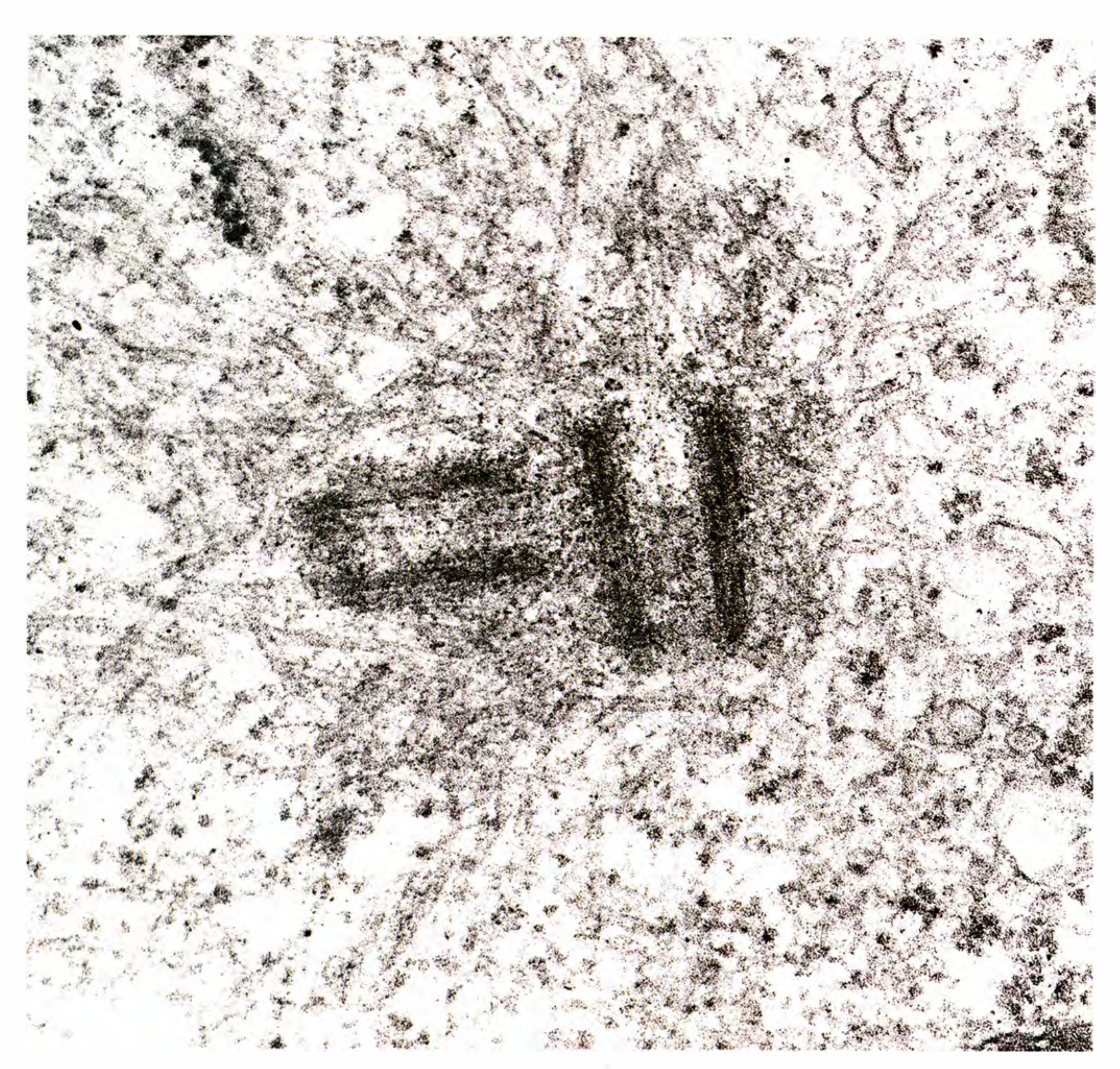
una consecuencia, no la causa, de la formación del huso.

Por fortuna para todos, el advenimiento de la microscopía electrónica aclararía la estructura de los centrosomas y de los microtúbulos asociados con ellos.

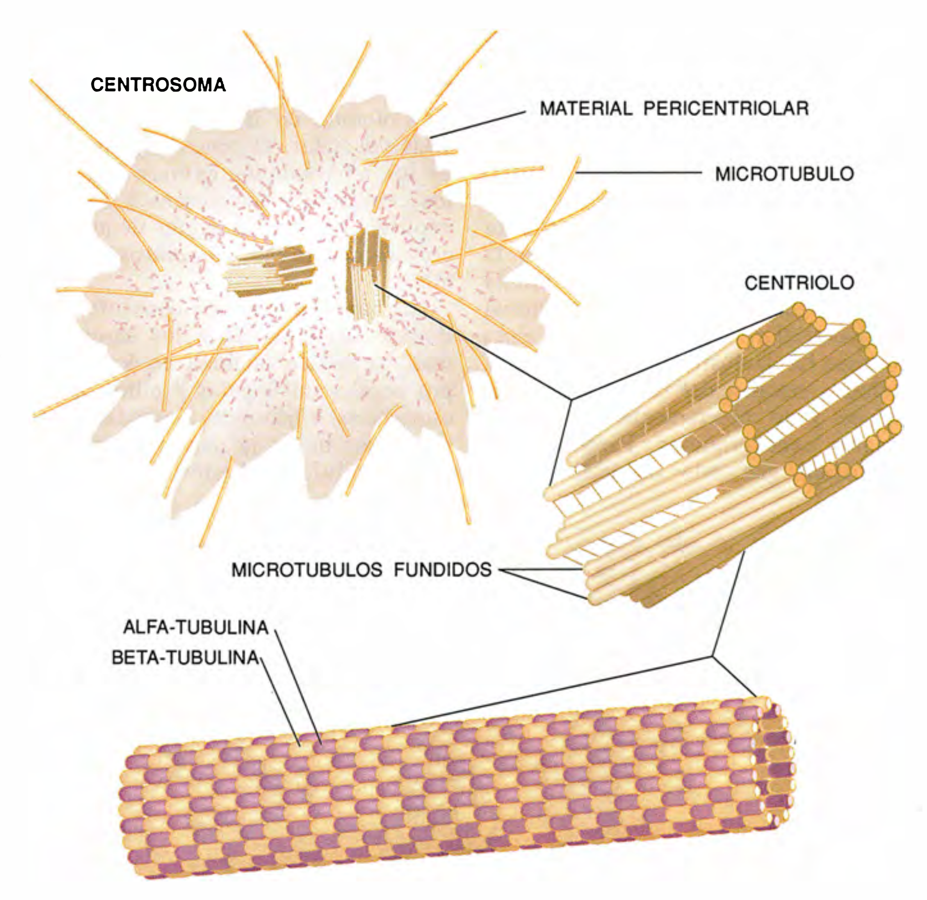
Hay, en el corazón del centrosoma de una célula animal, dos ordenaciones geométricas de microtúbulos, a las que se ha dado el nombre de centriolos. Cada centriolo consta de un haz cilíndrico de nueve varillas; cada varilla está constituida, a su vez, por tres microtúbulos de una longitud de unos 5000 angstroms, fundidos entre sí. Cortados en sección transversal, los centriolos semejan ruedas de fuegos artificiales. En las células animales, cada centrosoma posee dos centriolos, ortogonales entre sí y rodeados por una nube de material amorfo.

Confesamos nuestra ignorancia acerca de la naturaleza de la substancia envolvente en la propia designación de la misma: material pericentriolar. La microscopía electrónica ha demostrado que los microtúbulos emanan del material pericentriolar y no directamente de los centriolos centrosómicos. Parece, pues, verosímil que este material sea el centro organizador de los microtúbulos, expresión acuñada por Jeremy D. Pickett-Heaps, de la Universidad de Colorado en Boulder. En las células vegetales, el centro organizador de los microtúbulos es más difuso y los centriolos están ausentes, lo que explica que durante algún tiempo se creyera que faltaba el centrosoma en ellas.

Hoy se sabe que los centriolos no limitan su presencia a los centrosomas. Se hallan también en los cuerpos basales de flagelos y cilios, unas estructuras filiformes alargadas que se proyectan de la superficie de algunas células. Muchos eucariotas



lo se conocia ya desde hacía más de un siglo. Consta de dos centriolos, ortogonales entre sí y rodeados por una nube de material pericentriolar (*derecha*). Vistos en sección transversal, un centriolo revela una estructura de molinillo formada por los microtúbulos (*izquierda*). El centrosoma tiene la función de organizar los microtúbulos en el citoplasma especialmente durante la división celular. Al influir los microtúbulos sobre otras fibras proteicas, el centrosoma actúa como arquitecto del citoesqueleto.



2. LOS CENTRIOLOS, situados en el corazón de los centrosomas de las células animales, son estructuras tubulares. Cada una está formada por nueve varillas; cada varilla está constituida, a su vez, por tres microtúbulos fundidos entre sí todo a lo largo. Un microtúbulo es una fibra hueca constituida por subunidades que contienen las proteínas alfa- y beta-tubulina. Los microtúbulos citoplásmicos organizados por el centrosoma parecen crecer a partir del material pericentriolar y no directamente de los centriolos mismos.

unicelulares nadan en el medio en que se encuentran moviendo sus flagelos o cilios; algunas células especializadas del organismo, así las que recubren el tracto intestinal, se valen de cilios para desplazar las secreciones extracelulares. Puesto que los cuerpos basales coordinan, tal parece, la organización de los microtúbulos en flagelos y cilios, son fundamentales para su movimiento.

El descubrimiento de los centriolos en los centrosomas y cuerpos basales dio nuevo apoyo a una hipótesis, formulada sin previo acuerdo por L. F. Henneguy y M. Lehossek en 1898, y en virtud de la cual se trataría de estructuras interconvertibles. Observaciones realizadas en distintos organismos respaldan la idea. *Chlamydomonas* y otras algas unicelulares tienen dos flagelos, con su cuerpo basal cada uno; inmediatamente antes de que comience la mitosis, los flagelos de la célula se reabsorben, y los cuerpos basales parecen migrar entonces hacia el núcleo, donde se incorporan a los centrosomas que organizan el huso mitótico.

Aunque ambos, centrosoma y cuerpo basal, organizan los microtúbulos, lo hacen de manera diferente. Los microtúbulos del huso mitótico crecen a partir del material pericentriolar; los microtúbulos del cilio se desarrollan directamente a partir del centriolo del cuerpo basal. Expresado con precisión más ajustada, la formación de un cilio lleva consigo la constitución del axonema, estructura que crece mediante la adición de tubulina a dos de los tres microtúbulos de cada varilla del molinete. Así va elongándose progresivamente hasta llegar a ocupar la extensión entera del cilio. A lo largo del eje se desarrolla, además, un par supernumerario de microtúbulos, que no está en el centriolo. La estructura del axonema refleja la simetría nonaria del centriolo.

La estructura estable y ordenada del axonema contrasta con la disposición dinámica de los microtúbulos organizados por el centrosoma; poseen éstos propiedades que cambian durante el ciclo celular. Cuando una célula se encuentra en interfase —el período entre una mitosis y la siguiente—, de los centrosomas emerge una formación amplia de microtúbulos que se despliega por la mayor parte del citoplasma. A medida que la célula va entrando en mitosis, se derrumba la estructuración interfásica, y las subunidades de tubulina liberadas se reasocian de nuevo para crear una estructura completamente diferente, el huso mitótico.

¿Cómo se lleva a cabo semejante reorganización? Los microtúbulos que parten de los centrosomas son estructuras dinámicas: crecen y se encogen sin cesar en virtud de un fenómeno de inestabilidad dinámica. Un extremo de cada túbulo, el extremo (+), crece rápidamente porque las subunidades de tubulina, integrada cada una de ellas por dos proteínas (una tubulina alfa y otra beta), se le unen con suma avidez. El extremo (–) de cada microtúbulo crece con mayor parsimonia, hasta el punto de que podría despolimerizarse si su unión al centrosoma no lo mantuviera estabilizado. La inestabilidad característica de los microtúbulos permite su veloz redistribución, lo cual es de una enorme importancia para unas células que han de cambiar de forma, emigrar o dividirse.

Conforme la célula va entrando en mitosis, los microtúbulos del citoplasma se tornan muy inestables, y se despolimeriza la estructuración interfásica. Los centrosomas promueven el crecimiento de muchos microtúbulos extraordinariamente dinámicos. En vaivenes alternativos, estas fibras crecen en direcciones aleatorias y se encogen rápidamente. Si el extremo de un microtúbulo entra en contacto con un cinetocoro —una región especializada del cromosoma— el microtúbulo se le aferra y cesa de crecer y contraerse. Los centrosomas envían, en efecto, microtúbulos "sensores" a la búsqueda de cromosomas.

Con el tiempo, los microtúbulos de ambos centrosomas acaban uniéndose a los cinetocoros en todos los cromosomas replicados. Durante la metafase, los pares cromosómicos replicados se alinean en el ecuador del huso mitótico. Se separan luego y se encaminan hacia polos opuestos. Las fuerzas que mueven los cromosomas dependen de moléculas generadoras de fuerza —motores microtubulares— que están presentes en diversos lugares del aparato mitótico y que

han sido objeto de intenso estudio en los últimos años.

Las observaciones del citoesqueleto demuestran que los centrosomas organizan los microtúbulos, pero explican muy poco sobre el mecanismo a través del cual lo realizan. El hallazgo reciente de la gamma-tubulina, una proteína, podría representar un punto de inflexión en el camino de la respuesta.

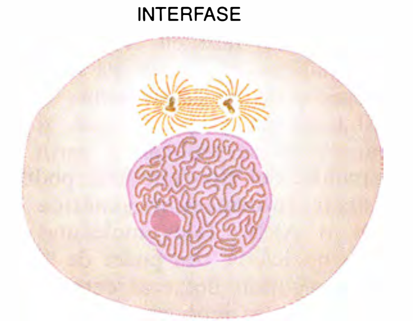
En 1989, el equipo de Berl R. Oakley, de la Universidad estatal de Ohio, descubrió la gamma-tubulina en *Aspergillus nidulans*, un hongo. Buscaban proteínas que interaccionasen con la beta-tubulina. Habían aislado ya una mutación del gen de la beta-tubulina que afectaba al comportamiento de los microtúbulos, cuando se propusieron encontrar una segunda mutación que librase a la célula mutante de ese defecto. Esa segunda mutación, razonaron, podría tener lugar en los genes de proteínas que interaccionan con la beta-tubulina y que podrían compensar la anomalía. Uno de los genes identificados codificaba una proteína que guardaba estrecha relación con la alfa- y con la beta-tubulina; la bautizaron con el nombre de gamma-tubulina. Para sorpresa del propio Oakley y de otros, la gamma-tubulina no era un componente de los microtúbulos sino del cuerpo polar del huso —el equivalente fúngico del centrosoma.

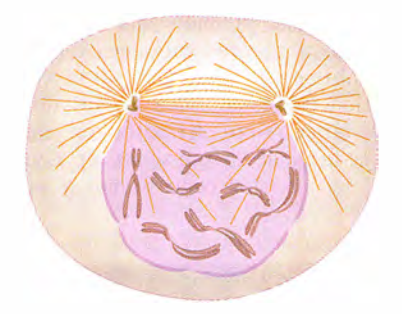
Ante tales datos, se pensó que la gamma-tubulina podría servir de punto de nucleación para el desarrollo de los microtúbulos. La gamma-tubulina se encuentra en el material pericentriolar, y parece ser imprescindible para la nucleación de los microtúbulos. La hipótesis general recibe nuevo respaldo de otra observación: la gamma-tubulina persiste en todos los eucariotas, lo que sugiere que desempeña una función importante en todos los centros organizadores de microtúbulos. La gamma-tubulina podría, por tanto, encerrar la llave molecular que los científicos buscan desde hace tiempo para abordar la forma en que el centrosoma organiza los microtúbulos.

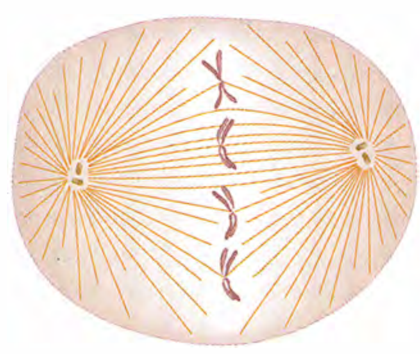
El mecanismo de replicación del centrosoma ha intrigado también a los biólogos desde el descubrimiento de este orgánulo. Boveri y van Beneden supusieron que el centrosoma era una entidad permanente y autónoma de la célula, lo mismo que el núcleo, y que se formaba por replicación y división de una estructura anterior del mismo tipo. La microscopía electrónica aplicada a la duplicación del centrosoma en células de cultivo corroboraba esa idea: cuando una célula se prepara para la división, el par de centriolos del interior centrosómico se escinde, y cada centriolo origina otro nuevo orientado y ortogonal a sí mismo. El nuevo centriolo consta en un comienzo de nueve microtúbulos organizados en un cilindro, pero pronto se transforman en tripletes de microtúbulos. Las dos parejas de centriolos emigran hacia extremos opuestos del núcleo y cada uno de ellos se lleva parte del material pericentriolar. La célula tiene en ese momento dos centrosomas. Dado que este modelo de replicación del centrosoma requiere la presencia de un centrosoma preexistente, suele decirse que el proceso está guiado por un molde o plantilla.

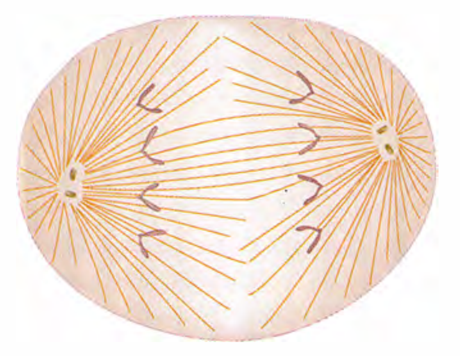
Abundan, por otro lado, los casos en que los centrosomas parecen surgir de manera espontánea. Así, y a tenor de sus condiciones de crecimiento, el protozoo *Naegleria* adopta forma flagelada o forma ameboide sin flagelo. Cuando se ha estudiado una ameba *Naegleria* después de haberla seccionado en cortes muy finos y haberla examinado con el microscopio, nunca se han hallado centriolos en el citoplasma. Pero aparecen los típicos cuerpos basales cuando la forma ameboide se convierte en flagelada. Da la impresión de que los centriolos de estos cuerpos basales se han constituido sin la ayuda de precursor alguno.

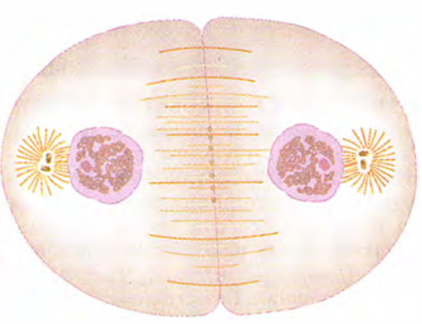
La aparente generación espontánea de los centrosomas no está necesariamente reñida con la posibilidad de que su replicación dependa de la existencia de un molde. En *Naegleria*, por ejemplo, el elemento









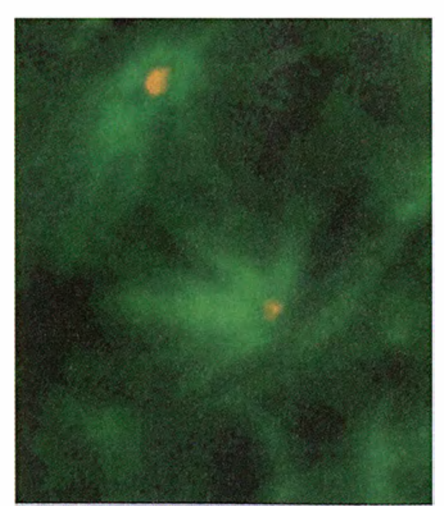


3. MITOSIS, o proceso de división celular. La mitosis está orquestada por los centrosomas. En la etapa de interfase, los centrosomas de una célula se asocian con el núcleo y se rodean de unas formaciones microtubulares estrelladas, los áster. En la profase, los centrosomas van emigrando hacia lados opuestos del núcleo, los cromosomas comienzan a condensarse en estructuras definidas y se desintegra la membrana que envuelve al núcleo. Los microtúbulos que se extienden a partir de los centrosomas forman un huso mitótico bipolar. Los cromosomas se alinean a lo largo de la zona media del huso mitótico durante la metafase y se trasladan luego hacia cada polo en la etapa de la anafase. Durante la telofase vuelven a sintetizarse las membranas nucleares; un surco, cada vez más profundo, hendido en la membrana plásmatica externa acaba partiendo la célula en dos.

replicativo del centrosoma podría atravesar una fase en el ciclo vital del organismo en el que ya no tiene el aspecto de un centrosoma.

Algunos han propuesto que, si los centrosomas se replican a partir de un molde, del tipo que sea, podrían encerrar información genética de ADN o ARN. Tales moléculas de ácidos nucleicos, con poder de duplicación, podrían dotar al centrosoma de propiedades replicativas. Diversos laboratorios se han embarcado en la búsqueda de ácidos nucleicos en los centrosomas, si bien sus resultados son hasta el presente cuestionables y ambiguos. En 1971 apareció una revisión del estado del asunto donde se citaban siete artículos en favor de la tesis de la presencia de ácidos nucleicos en los centrosomas y otros ocho en contra de que los hubiera allí. La solución está todavía en el alero.

El fracaso en este frente no ha impedido que se descubrieran algunas verdades fascinantes acerca de la regulación de la división del centrosoma. Le conviene a la célula que su centrosoma se divida una vez, y sólo una vez, en cada ciclo celular. Si no se replicara, no podría formarse el huso mitótico bipolar, ni dividirse, por ende, la propia célula; ahora bien, si el centrosoma llegara a replicarse más de una vez, podrían formarse husos multipolares, y los cromosomas no se segregarían correctamente. La investigación del ciclo celular ha sacado a la luz datos sorprendentes en torno a los controles sobre la división del centrosoma y su conexión con otros fenómenos del ciclo celular.





4. MUTANTES CARRUSEL de *Drosophila melanogaster*, la mosca de la fruta. Presentan un centrosoma que no se escinde. En el tipo salvaje (*fotografía superior*), los microtúbulos (*verde*) forman un huso mitótico con los centrosomas (*amarillo*) en los polos. En la mosca mutante (*fotografía inferior*), emerge un huso monopolar. Los cromosomas dibujan un círculo alrededor del centrosoma.

Los biólogos acostumbran dividir el ciclo celular en mitosis e interfase; la mitosis es el acto de la división celular, mientras que la interfase es el período entre dos mitosis consecutivas. La interfase se subdivide a su vez en tres partes: G1, fase que sigue a la mitosis; fase S, durante la cual se duplica el ADN cromosómico, y G2, un nuevo intervalo que precede a la nueva mitosis. La genética de levaduras nos sugiere que debe concluir cada paso del ciclo antes de iniciarse el siguiente. Si la fase S se bloquea con la mutación de un gen necesario para la replicación del ADN, el ciclo se detiene en ese punto y las células no entrarán en mitosis. De igual modo, si los cromosomas no están alineados sobre la placa metafásica, la anafase no puede proseguir.

Es como si un conjunto de puntos de control asegurase que los pasos críticos se realicen bien antes de permitir el paso al siguiente. Las células de los tejidos de los organismos multicelulares también parecen recorrer este ciclo sujeto a una regulación semejante. Se ha demostrado que, en tales células, el bloqueo de la síntesis de ADN impide la replicación del centrosoma, lo que abona la idea de una vinculación de ambos procesos.

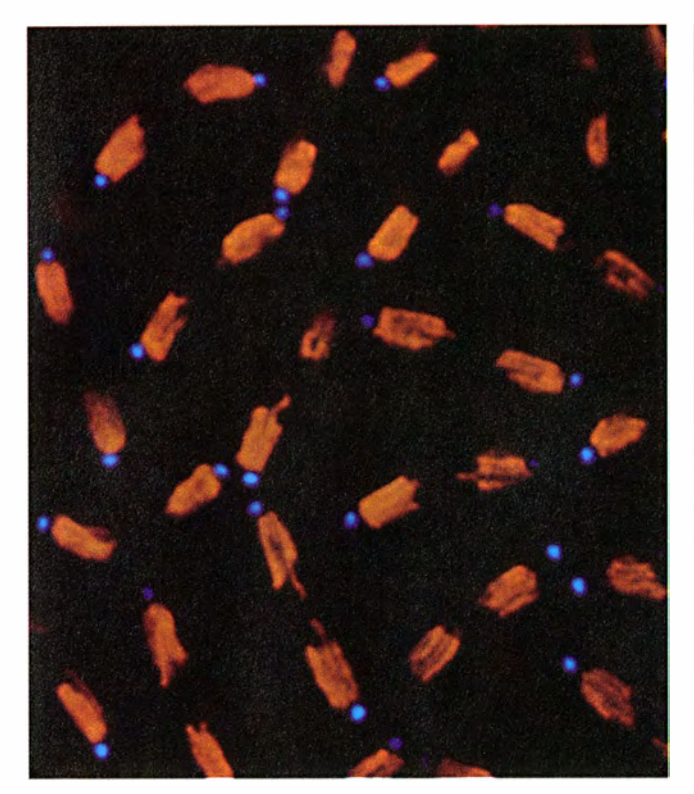
Una relación que, sin embargo, no puede generalizarse. Los embriones de muchos organismos sufren, en sus primeros estadios, ciclos celerísimos de división, lo que mueve a pensar que carecen de una regulación con puntos de control. Las células embrionarias alternan rápidamente entre fases S y mitosis, sin intervalos intermedios. La manipulación de sus ciclos celulares intentada mediante mutaciones o fármacos no suele inhibir más de un proceso replicativo. Otros aspectos del ciclo prosiguen durante algún tiempo.

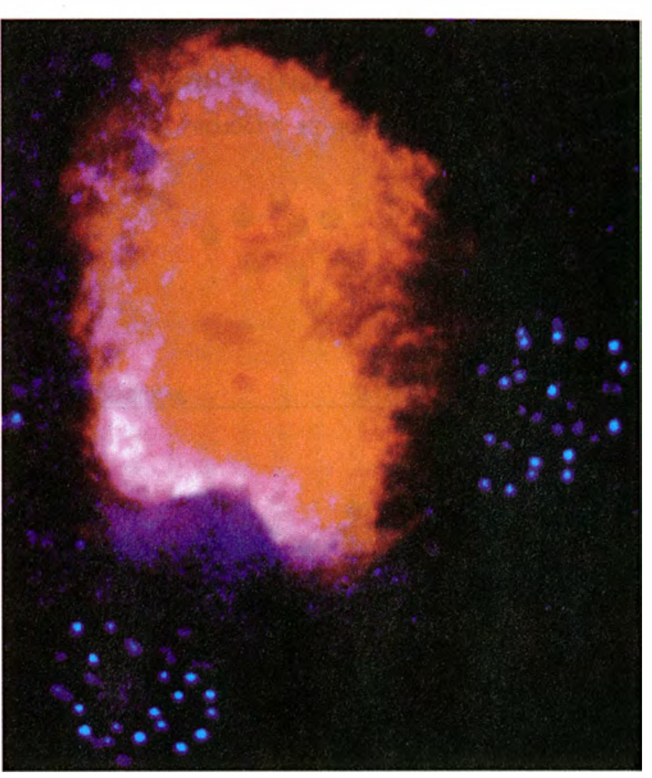
Por ese motivo, la investigación se ha volcado en la replicación del centrosoma durante los ciclos mitóticos rápidos de embriones de numerosos organismos. Muchos de los experimentos más significativos los realizó, en los años sesenta, el grupo encabezado por Daniel Mazia, entonces en la Universidad de California en Berkeley. Desacoplaron la replicación nuclear y la centrosómica en huevos fecundados del dólar de playa y del erizo de mar, y demostraron que el centrosoma se replicaba aun cuando no hubiera replicación nuclear, si bien esa disociación no se presenta normalmente en la mayoría de las células.

Nuestro trabajo con embriones de la mosca de la fruta *Drosophila melanogaster* ilustra también hasta qué punto pueden desacoplarse la replicación centrosómica y la replicación nuclear; en estos embriones los ciclos mitóticos, los más cortos de todos los conocidos, duran sólo unos diez minutos. Las propias células de mamíferos que proliferan con la mayor rapidez se dividen una vez cada 12 horas, más o menos.

El desarrollo de *Drosophila* comienza con 13 ciclos de división nuclear rápida; durante ellos, los núcleos replicantes no se separan en células que estén compartimentadas por membranas. Esos núcleos residen dentro de un citoplasma común y una misma membrana, formando un sincitio. Después de los siete primeros ciclos de división sincrónica, la mayoría de los núcleos emigran del interior del embrión hacia la superficie. Las mitosis sincrónicas continúan hasta que unos 6000 núcleos se disponen en una monocapa situada por debajo mismo de la superficie del embrión sincitial. En ese momento, se forman las membranas que ciñen cada núcleo y se crea un embrión multicelular. A partir de entonces, las células adoptan un ciclo regulado de división.

Los primeros ciclos de la división nuclear son demasiado cortos para permitir la expresión de los propios genes del embrión —el ADN embrionario se está replicando o separándose hacia los núcleos hijos. Sólo cuando el ciclo celular se alarga comienza la expresión de los genes del embrión. La madre debe cubrir, por tanto, todas las necesidades de pro-





5. NO SIEMPRE VA UNIDA LA REPLICACION del ADN nuclear y la de los centrosomas. En estas micrografías, los colorantes fluorescentes han teñido el ADN de color naranja y los centrosomas de azul. En el embrión de una mosca de la fruta *Drosophila* de tipo salvaje (*izquierda*), cada grupo de cromosomas es atraído, durante la anafase, hacia un centrosoma. En mutantes de núcleo gigante (*micrografía de la derecha*), los centrosomas se disocian del núcleo. Tanto los centrosomas como el ADN siguen replicándose, aunque de manera independiente. No se forman husos mitóticos.

teínas para las 13 primeras mitosis. La dote materna tiene que ser suficiente para conformar al menos 6000 núcleos y todo el aparato mitótico asociado, incluidos centrosomas y otros componentes. Las mutaciones que se produzcan en los genes maternos correspondientes a esas proteínas pueden provocar alteraciones de carácter deficitario en las mitosis embrionarias.

En la mutación del núcleo gigante de *Drosophila*, por ejemplo, el ADN nuclear y los centrosomas experimentan tandas repetidas de replicación. Por razones desconocidas, los centrosomas se disocian del núcleo. Estos embriones se desarrollan con un número pequeño de núcleos que crecen hasta alcanzar proporciones gigantescas.

Se observa un efecto afín en los embriones normales de *Drosophila* a los que se ha inyectado afidicolina, un fármaco inhibidor de una enzima esencial para la replicación del ADN. En tales embriones, los centrosomas se disocian de los núcleos y se replican por su cuenta. Otros procesos mitóticos siguen completando sus ciclos en los embriones tratados con afidicolina, incluidas la degradación y la reconstrucción de la envoltura nuclear o la condensación y descondensación de los cromosomas.

En los primeros estadios del embrión, la mitosis consta, parece ser, de varios procesos cíclicos que se producen en paralelo. Débilmente coordinados entre sí, pueden realizarse de manera independiente. Sabemos ya que la disociación de los centrosomas de los núcleos y su aparente replicación autónoma es un rasgo común de varias mutaciones que afectan a las primeras mitosis de los embriones de *Drosophila*. En estadios de desarrollo más avanzados, esas mutaciones tienen efectos muy diferentes: detienen el ciclo celular en algún punto, por lo común, y, con frecuencia, obstaculizan la replicación del centrosoma. Los ciclos celulares del desarrollo posterior de *Drosophila* parecen exigir una progresión correcta a través de una serie de puntos de control regulados, de manera similar a lo que sucede en la levadura.

Los datos acumulados sugieren que, al cebar los microtúbulos, los centrosomas influyen indirectamente en la organización de otros elementos citoesqueléticos, de los filamentos de actina en particular. Tal vez la manifestación más llamativa sea la del efecto que se observa después de la mitosis, cuando se separa el citoplasma de dos células hijas. Con diversos tratamientos experimentales se activa artificialmente el desarrollo de huevos de rana en ausencia de espermatozoides, pero los óvulos así activados carecen de centrosoma y no pueden dividirse: el centrosoma funcional de un embrión suele proceder del espermatozoide fecundante; a pesar de todo, el óvulo proseguirá su curso en muchos aspectos del ciclo celular como si intentara dividirse, y, si inyectamos centrosomas purificados en un óvulo activado, éste se dividirá.

Los centrosomas logran tal hazaña porque organizan los componentes citoesqueléticos esenciales para la división celular. Los filamentos de actina y de miosina forman un anillo contráctil entre los dos polos del huso mitótico. Este anillo, que se une a la membrana plasmática que ciñe a la célula, se contrae gradualmente y estruja la célula hasta partirla en dos. El mecanismo responsable de la generación de tal fuerza contráctil es semejante al de la contracción muscular, que involucra también la interacción

Centrosomas y desarrollo de las células polares

EMBRION DE 7 CICLOS

SIN TRATAR

AFIDICOLINA

EMBRION DE 10 CICLOS

EMBRION ANORMAL

En una etapa temprana del desarrollo de *Drosophila*, los núcleos (*malva*) y los centrosomas (*amarillo*) se replican en el centro de un citoplasma común. Los centrosomas se encaminan luego hacia la superficie del embrión y arrastran consigo a los núcleos. En el extremo posterior se forman células polares (*azul*) alrededor de los núcleos y centrosomas. Si se inyecta afidicolina, un fármaco que inhibe la replicación del ADN, en un embrión que se encuentre en las primeras etapas de desarrollo, los centrosomas se replican y emigran sin los núcleos; pueden formarse las células polares (*fotografía*).

entre filamentos de actina y de miosina.

El anillo contráctil se forma siempre en la mitad exacta del camino entre los polos y en un plano perpendicular al huso. Aunque cumple a los dos centrosomas organizar los filamentos de actina y miosina, se desconoce el modo mediante el cual consiguen ensamblar el anillo contráctil en el punto medio.

Los centrosomas dirigen la ordenación de los filamentos de actina en el embrión de *Drosophila*. A medida que los núcleos se van dividiendo y se encaminan hacia la superficie del embrión, el citoesqueleto se reorganiza de arriba abajo; la actina de la superficie del embrión teje una suerte de cestos de filamentos sobre cada núcleo. En el polo posterior del embrión, se forman casquetes de actina mucho mayores sobre los núcleos, que acaban segregándose e independizándose en la superficie hasta crear la primera dotación de células. Avanzado ya el proceso de desarrollo, la progenie de estas células polares se convierte en células germinales (precursoras de óvulos y espermatocitos).

En la superficie de otras regiones del embrión, los núcleos atraviesan cuatro tandas más de división antes de la síntesis de las membranas que habrán de acotar células individuales durante el ciclo 14. Se alcanza ese estadio una hora más tarde de haberse formado las células polares. Si se inyecta citoplasma del polo posterior de un embrión en una región cualquiera de otro embrión, éste iniciará la formación de una célula polar a medida que los núcleos se vayan trasladando hacia el sitio de la inyección. Demuestra ello la presencia de información en el citoplasma que inicia la génesis de la célula polar cuando los núcleos llegan a la corteza posterior.

No ha mucho descubrimos un fenómeno sorprendente: los centrosomas están capacitados para iniciar, por sí solos, el proceso de formación de células polares. Comprobamos que, si inyectábamos afidicolina en un estadio embrionario precoz de *Drosophila*, se inhibía la división nuclear y, por ende, el desplazamiento de los núcleos hacia la superficie. Pero los centrosomas continuaban dividiéndose y emigrando.

Si valiera la imagen, el centrosoma es la locomotora que tira del núcleo, camino de la superficie del embrión, arrastrándolo sobre un raíl de microtúbulos. En los embriones tratados con afidicolina, la inhibición de la replicación del ADN desacopla del centrosoma el núcleo; y así sólo el centrosoma busca la superficie. Los centrosomas que alcancen el polo posterior iniciarán incluso la formación de células polares, aunque cada célula polar carezca de núcleo. Los centrosomas de la superficie de otras regiones del embrión pueden activar la formación de casquetes de actina, a pesar de la ausencia de núcleos; no pueden, sin embargo, inducir la formación de células.

Así pues, los centrosomas, además de ser capaces de organizar los filamentos de actina, pueden responder también a informaciones en el citoplasma posterior e iniciar la formación de células polares. La naturaleza de la interacción entre los centrosomas y el citoplasma posterior se desconoce. Es posible que componentes del citoplasma posterior alteren las propiedades de los microtúbulos citoplásmicos, con el resultado de que los microtúbulos dirijan la formación de la célula y no sólo la formación del casquete de actina.

Los centrosomas dejan sentir su influjo en otros componentes de la red citoesquelética a través de la organización de los microtúbulos. Esos microtúbulos poseen otras funciones vitales: organizan los filamentos intermedios, ayudan a determinar la polaridad celular, dirigen el transporte intracelular de moléculas y distribuyen por el interior celular otros orgánulos (aparato de Golgi y retículo endoplasmático). De este modo, los centrosomas y los microtúbulos que a partir de ellos se generan controlan muchos aspectos de la organización celular.

Tenemos un conocimiento insuficiente del funcionamiento molecular del centrosoma. Importa sobremanera caracterizar las macromoléculas que constituyen el centrosoma; pero no bastará el estudio pormenorizado

de cada una para dar respuesta satisfactoria a todas las cuestiones planteadas. Esto último exigiría recomponer la función del centrosoma en un sistema libre de células, allí donde podamos manipular componente a componente.

Hay varios laboratorios comprometidos en el empeño. Se muestran prometedores los extractos libres de células obtenidos a partir de huevos de rana. El grupo dirigido por Eric Karsenti, del Laboratorio Europeo de Biología Molecular en Heidelberg, añadió centrosomas purificados a extractos de huevos de rana inmaduros, que se encontraban en un estadio semejante a la interfase. Los centrosomas nuclearon haces largos de microtúbulos dotados de propiedades parecidas a las propias de microtúbulos citoplásmicos de células interfásicas. Si añadían los centrosomas a extractos de huevos de rana inmaduros que se hallaban en un estadio mitótico, los centrosomas originaban haces de microtúbulos mucho más cortos y menos estables, semejantes a los del huso mitótico. Los centrosomas añadidos respondían, por tanto, a señales citoplásmicas que cambiaban durante el ciclo celular.

Una de estas señales era una proteína quinasa, enzima que añade grupos fosfato a determinadas proteínas celulares para modificar su comportamiento. Cuando agregamos proteína quinasa a extractos de huevos de rana que contienen centrosomas y haces de microtúbulos del tipo de interfase, la enzima convierte los microtúbulos en conjuntos más dinámicos semejantes a los mitóticos. Según todos los indicios, se requiere la presencia de la misma proteína quinasa en las células eucariotas para desarrollar otras facetas relativas a la entrada en mitosis.

Con el tiempo irán identificándose los distintos componentes del centrosoma y acabaremos por sintetizar en el laboratorio un centrosoma funcional. El recurso a los anticuerpos ha permitido conocer varias proteínas asociadas con el centrosoma. En la Universidad de Dundee nosotros nos hemos servido de ellos para descubrir y clonar el gen de una proteína de la mosca *Drosophila* que se asocia con el centrosoma durante la mitosis. Otros laboratorios están utilizando la afinidad inherente de los microtúbulos por las moléculas con las que interaccionan: los microtúbulos purificados pueden servir de anzuelo para pescar componentes moleculares de los centrosomas.

El enfoque bioquímico complementa el enfoque genético, que ha demostrado ser un instrumento poderoso para identificar los componentes de muchas funciones biológicas. Mediante el tratamiento de los cromosomas con agentes mutágenos o radiaciones ionizantes promueve el desarrollo de individuos mermados con genes a los que se les ha suprimido su capacidad funcional; de los cambios operados por tales mutaciones en la conducta, los genéticos infieren cuál es la misión que cumple la forma normal de la proteína del gen.

La investigación genética con levaduras y con la mosca de la fruta ha producido ya mutaciones que alteran el comportamiento del cromosoma. La conocida por mutación "carrusel" modifica la conducta del centrosoma durante la mitosis: las células mutantes no forman el huso bipolar acostumbrado, sino otro que tira de todos los cromosomas hacia un único centrosoma (de ahí el nombre de la mutación). Ignoramos el papel que desempeña el gen carrusel; de momento sirve para poner de manifiesto que basta una mutación puntual para subvertir las funciones de estructuras complejas.

A medida que vayamos ahondando en los recovecos de esas interacciones genéticas, iremos conociendo las funciones que competen a los distintos componentes del centrosoma. Las manipulaciones genéticas, en sintonía con la bioquímica, habrán de facilitar el esclarecimiento del funcionamiento molecular del centrosoma. El día que eso llegue, tendremos respuesta inmediata para muchos de los interrogantes que han acompañado, y acompañan, al quehacer investigador.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE DISSOCIATION OF NUCLEAR AND CENTROSOMAL DIVISION IN *GNU*, A MUTATION CAUSING GIANT NUCLEI IN *DROSOPHILA*. M. Freeman, C. Nüsslein-Volhard y D. M. Glover en *Cell*, vol. 46, n.º 3, págs. 457-468; 1 de agosto de 1986.

CENTROSOMES, AND NOT NUCLEI, INITIATE POLE CELL FORMATION IN *DROSOPHILA* EMBRYOS, J. W. Raff y D. M. Glover en *Cell*, vol. 57, n.º 4, págs. 611-619; 19 de mayo de 1989.

MOLECULAR BIOLOGY OF THE CELL. Bruce Alberts. Garland Press, 1989.

CONTROL DEL CICLO CELULAR. Andrew W. Murray y Marc W. Kirschner, *Investigación y Ciencia*, mayo de 1991, págs. 26-33.

THE CENTROSOME. Dirigido por V. I. Kalnins. Academic Press, 1992.

Ciencia y sociedad

Plasticidad sináptica

El papel del glutamato

La plasticidad de las sinapsis es evidente en el establecimiento y refinamiento de las conexiones neuronales durante el desarrollo cerebral, donde los conos de crecimiento de las neuronas recorren largas distancias hasta encontrar la célula diana correcta. Las sinapsis maduras también son susceptibles de modulación. Se empieza a aceptar ya que la capacidad de aprendizaje y de memoria, es decir, los procesos que nos permiten adquirir y retener nuevos conocimientos, respectivamente, podrían estar sustentados en cambios más o menos duraderos en la intensidad de la transmisión sináptica.

La capacidad de memoria a corto plazo podría incluir el reforzamiento de las conexiones sinápticas existentes, a través de modificaciones covalentes en las proteínas, en tanto que la memoria a largo plazo necesitaría del crecimiento de nuevas conexiones sinápticas mediado por la expresión de genes y de la síntesis de nuevas proteínas.

En términos generales, esta capacidad de cambio de las sinapsis se conoce como plasticidad y constituye la base de la capacidad adaptativa de los circuitos neuronales.

Si bien inicialmente se pensó que hasta los mecanismos elementales de aprendizaje y memoria requerían complejos circuitos neuronales, Donald O. Hebb propuso, ya en 1947, que los mecanismos básicos de estos procesos podían ser bastante simples y perfectamente explicables dentro de las propiedades de las conexiones sinápticas individuales. El análisis de los circuitos neuronales que pueden hallarse implicados en las distintas formas de aprendizaje ha demostrado que este proceso podría estar representado, en el marco de una sinapsis individual, en un cambio de intensidad de las conexiones sinápticas. Por consiguiente, una forma eficaz de reforzar las conexiones sinápticas sería la activación coincidente de las neuronas presináptica y postsináptica de la misma sinapsis.

Tales predicciones se han confirmado experimentalmente. En 1973 Bliss y Lomo mostraron que la estimulación breve y frecuente de determinadas sinapsis del hipocampo producía un aumento persistente de la eficacia sináptica de dicha vía. Esta potenciación dura horas e incluso días y semanas en determinadas circunstancias, como es el caso de los animales de laboratorio mantenidos despiertos. Bliss y Lomo denominaron a ese fenómeno potenciación a largo plazo (PLP); y se ha comprobado que el aprendizaje de determinadas tareas, por parte de los animales de experimentación, requiere la PLP.

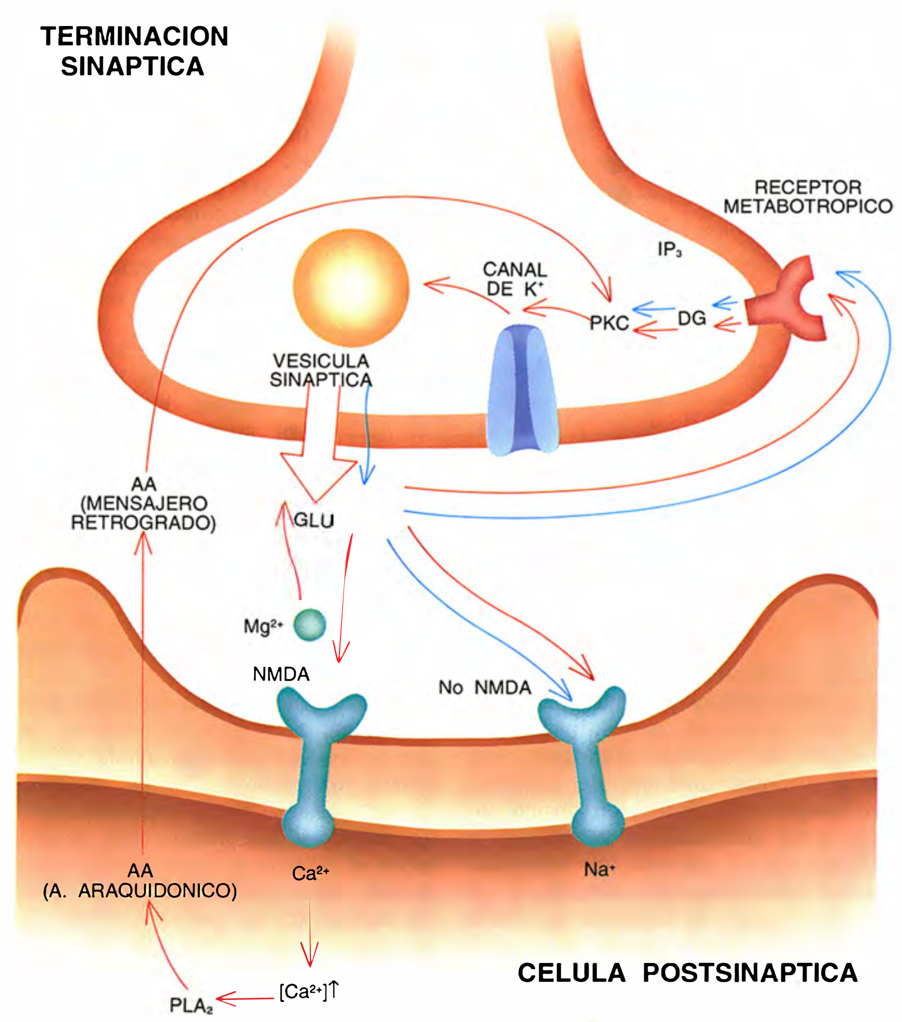
La potenciación a largo plazo se ha observado en las conexiones sinápticas de las células piramidales de las regiones CA1 y CA2 del hipocampo, que utilizan ácido glutámico como neurotransmisor. Neurotransmisor que está capacitado para unirse a dos tipos de receptores constituidos por canales iónicos, el NMDA (porque es activado selectivamente por el agonista *N*-metil-D-aspártico) y no-NMDA.

Los receptores no-NMDA son responsables de la mayor parte de la transmisión sináptica en las vías glutamatérgicas porque el canal iónico de los receptores NMDA está bloqueado por Mg^{2+}. Ahora bien, estos receptores NMDA son los que participan activamente en la inducción de PLP. Para que haya flujo iónico, el receptor NMDA ha de ser activado de una forma asociativa; la membrana que aloja el receptor NMDA ha de despolarizarse para eliminar el bloqueo por Mg^{2+}, y el receptor, además, ha de unir el agonista glutamato así como el co-agonista glicina. La función de la serie de impulsos de alta frecuencia en las células presinápticas, condición necesaria para inducir PLP, es pues, la de despolarizar la membrana postsináptica de manera suficiente para atenuar el bloqueo del Mg^{2+}. Se suele alcanzar tal despolarización con el disparo sincronizado de muchas terminaciones sinápticas, lo que a su vez producirá la activación de muchos receptores no-NMDA en la célula postsináptica. Una vez activado el canal iónico asociado al receptor NMDA, penetran Ca^{2+} y Na^{+} en la célula postsináptica. La entrada de Ca^{2+} parece ser responsable de la iniciación del reforzamiento de la transmisión sináptica a través de la activación de varias quinasas: proteína quinasa II dependiente de Ca^{2+} y calmodulina, proteína quinasa C y quinasas de tirosina.

Aunque la indución de PLP tiene lugar en la célula postsináptica, su expresión y mantenimiento parecen necesitar de una mayor liberación del neurotransmisor glutamato. Pero, ¿cómo se enteran las terminaciones sinápticas de que deben avivar la liberación de neurotransmisor para contribuir al reforzamiento de la transmisión en esas sinapsis? El equipo de R. V. P. Bliss ha propuesto que la neurona postsináptica sintetiza y envía un mensajero intercelular, un "mensajero retrógrado", que se propaga rápidamente fuera de la célula postsináptica y que, después de atravesar la hendidura sináptica, llega a la terminación nerviosa donde promueve la liberación del ácido glutámico; se llama "retrógrado" porque efectivamente la información procede hacia atrás.

Entre las moléculas candidatas para desempeñar esta función de mensajero retrógrado están el ácido araquidónico y el óxido nítrico (NO). Los autores de esta nota han encontrado que el ácido araquidónico podría contribuir de una manera decisiva al reforzamiento de las sinapsis glutamatérgicas incrementando la liberación del neurotransmisor.

¿De qué modo el ácido araquidónico insta la liberación de ácido glutámico? En las terminaciones sinápticas glutamatérgicas hay receptores de glutamato del tipo metabotrópico (un tercer tipo de receptores de glutamato que están asociados a la generación de segundos mensajeros). La activación de estos receptores genera diacilglicerol, activador fisiológico de la PKC (proteína quinasa dependiente de Ca^{2+} y fosfolípidos). La unión del ácido glutámico a este receptor presináptico resulta en la liberación de más neurotransmisor, a condición, sin embargo, de que se halle presente el mensajero retrogrado ácido araquidónico. La PKC de las terminaciones nerviosas constituye la proteína clave del mecanismo facilitador de la liberación del ácido glutámico, en tanto que el ácido araquidónico desempeña el papel de cebador o sensibilizador de dicha enzima. Ahora bien, en ausencia de ácido araquidónico la unión del neurotransmisor al receptor presináptico no dispara la acción facilitadora.



El mecanismo de reforzamiento de las sinapsis glutamatérgicas podría seguir el esquema ilustrado. Además del receptor metabotrópico, el glutamato activa, por lo menos, tres receptores ionotrópicos distintos: el N-metil-D-aspártico *(o NMDA), el ácido alfa-amino-3-hidroxi-5-metil-4-isoxazol propiónico (o AMPA) y los subtipos kainatos. Durante la estimulación normal de las sinapsis glutamatérgicas (*flechas azules*), el neurotransmisor glutamato liberado activa los receptores postsinápticos del tipo AMPA/kainato, que son los responsables de la neurotransmisión excitatoria rápida. El glutamato, en cambio, no activa el receptor NMDA, por la sencilla razón de que el canal iónico asociado a dicho receptor se encuentra bloqueado por* Mg^{2+}*. El receptor presináptico de tipo metabotrópico, aunque puede ser activado, no inhibe el canal de* K^+ *presináptico, porque la proteína quinasa C (PKC) es relativamente insensible al diacilglicerol en ausencia de ácido araquidónico (AA). Ahora bien, durante una estimulación repetitiva (*flechas rojas*), condición ésta necesaria para inducir la potenciación a largo plazo, se activa el receptor NMDA, aumenta la concentración de* Ca^{2+} *en la neurona postsináptica y entra en acción la fosfolipasa* A_2 *(*PLA_2*) que genera el ácido araquidónico. Este llega a la terminación presináptica, donde sensibiliza la PKC que ahora sí responde al diacilglicerol generado por el receptor metabotrópico, inhibiendo un canal de* K^+ *y haciendo más largos los potenciales de acción, con el consiguiente aumento en la liberación de neurotransmisor*

En la plasticidad asociativa del hipocampo y otras áreas cerebrales se hallan, pues, involucradas ciertas proteínas que conforman vías de traducción de señales; las vías son convergentes y responden de una manera característica cuando estas señales son coincidentes en el tiempo; la respuesta es mayor que la que tendría cada una por separado.

En consecuencia, la capacidad para percibir que dos señales distintas coinciden parece constituir una propiedad de las proteínas que intervienen en el aprendizaje asociativo. El receptor postsináptico de glutamato de tipo NMDA es un claro ejemplo; su activación requiere dos señales coincidentes: la despolarización y la unión del agonista glutamato. Asimismo, la proteína quinasa C de las terminaciones sinápticas podría constituir otra de estas proteínas donde convergen distintas señales, ya que su activación y el fomento consiguiente de la liberación de neurotransmisor requiere una doble señal: el mensajero retrógrado araquidonato y el neurotransmisor glutamato. De esta manera se lograrían sintonizar, por medio del mensajero retrógrado, los acontecimientos postsinápticos con los presinápticos (normalmente es al revés).

Además, este doble requerimiento del mecanismo facilitador implicaría que, si bien el mensajero retrógrado puede propagarse desde la postsinapsis a muchas terminaciones presinápticas, el reforzamiento de la transmisión sináptica estaría limitado a las sinapsis que se han activado con anterioridad. (José Sánchez-Prieto Borja, Inmaculada Herrero Sastre y María Teresa Miras Portugal, de la facultad de veterinaria de la Universidad Complutense de Madrid).

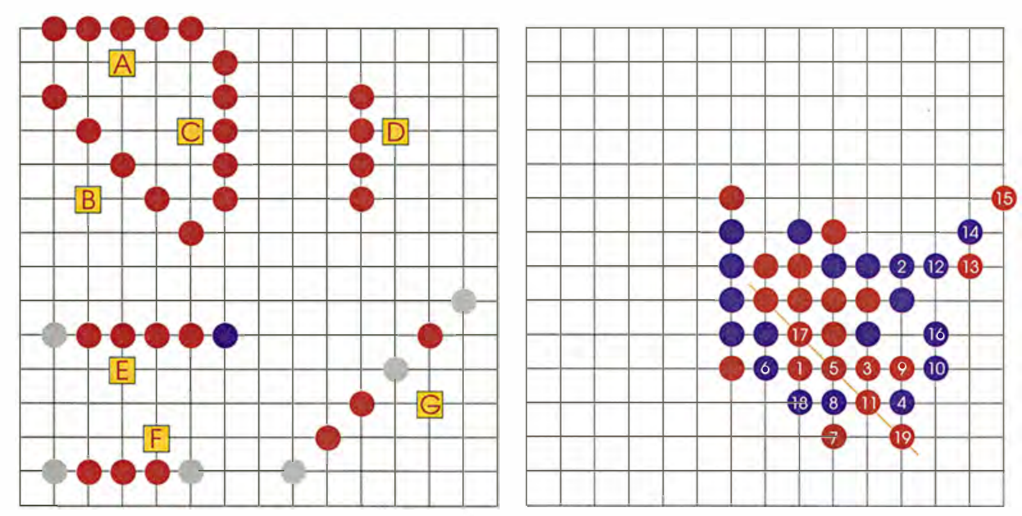
Go-Moku

Quien sale, gana

El juego del go disfruta en el Japón del interés que despierta el ajedrez en Occidente. Juego de estrategia y concentración, no está el ganar en manos de la suerte. Existe una versión más suave, con las mismas piezas e idéntico tablero: se denomina go-moku, o cinco en raya, y se rige por reglas sencillas.

Juegan dos contendientes. Comienzan por colocar, en vez alternativa, una pieza negra y otra blanca en alguno de los puntos de intersección de una malla de 15 por 15 líneas. Salen las negras. Durante la partida no pueden retirarse del tablero las piezas ya colocadas. El primero que complete una línea con cinco fichas suyas ganará; la secuencia pentamérica puede ser horizontal, vertical o diagonal. No está permitido situar en una misma fila seis piezas de idéntico color. Se ha de formar la línea por cinco piezas consecutivas del mismo color.

Los aficionados nipones han venido dando por supuesto que siempre se alzará con la victoria el que juegue con las negras, aunque no contaban con ningún algoritmo matemático que lo avalase. Nosotros hemos



(Izquierda) A, B, C *son posiciones ganadoras del jugador rojo. En* D *gana el rojo en su siguiente movimiento. En* E, F, G *los puntos grises indican los movimientos forzados del jugador azul.* (Derecha) *Los puntos no numerados son movimientos ya hechos. Mediante una serie de jugadas forzadas, el jugador rojo logra en la jugada 17 dos alineamientos de 4, y gana en la 19*

creado un programa informático que les da la razón. La partida de go-moku se va desarrollando con la construcción constante de series amenazadoras de posible línea que obligan al contrario a crear defensas obstruccionistas. Quien logre, por fin, construir dos cadenas amenazantes que no puedan ser contrarrestadas con un solo movimiento de réplica vence en su turno siguiente. Los buenos jugadores crean dos cadenas amenazantes en solo 20 movimientos. Ello significa que, en cada paso, han de atender a pocas alternativas, que no trascienden su capacidad normal de análisis.

A imagen del humano, los programas de ordenador se centran en el descubrimiento de cadenas amenazantes. Con frecuencia, el programa encuentra pronto una estrategia ganadora, pero hay veces en que, tras "largas meditaciones", acaba rindiéndose sin haber descubierto si existe o no una forma de vencer. Ello se debe a que los programas suelen investigar todos los posibles caminos a seguir desde una posición inicial dada hasta obtener cadenas amenazantes, incluidas las que el jugador humano desecharía de entrada por inviables. El árbol de decisiones que conduce a la solución se hace entonces extremadamente frondoso. Una disposición de las fichas que sea de una complejidad mediana puede muy bien implicar varios millones de movimientos a estudiar.

Nuestro programa "Victoria" utiliza una nueva estrategia de búsqueda de cadenas amenazantes. La denominamos "búsqueda por el espacio de amenaza". Como es sabido, los algoritmos tradicionales investigan todos los movimientos posibles partiendo de una posición determinada. No procede así nuestro algoritmo, que imita el comportamiento del humano; la búsqueda se limita, en primer lugar, a los movimientos en los que la última pieza amenazante colocada pueda desarrollar otra función, y, en segundo lugar, la búsqueda se ciñe a los movimientos capaces de combinar dos cadenas amenazantes, hasta ese turno independientes, en una nueva cadena amenazante. Con ese algoritmo, Victoria tarda 0,2 segundos en averiguar si determinada situación de las fichas en el tablero permite tomar el camino del triunfo. Si la configuración de la partida en juego no deja ver la posibilidad de crear una cadena amenazante a través de la doble vía indicada, el programa recurrirá a una estrategia de búsqueda adicional.

La partida se considera resuelta cuando se demuestra que uno de los contendientes gana, pierde o se queda en tablas, sin que el contrario, por capaz que sea, pueda remontar la situación. Para hallar la solución nos valimos de una función de evaluación, en virtud de la cual el programa está capacitado para responder si, ante una configuración determinada de las fichas sobre el tablero, existe una cadena amenazante: o declara vencedora la cadena o indica que la partida prosigue.

Nuestro algoritmo parte de la premisa de que las negras sitúan su primera ficha en el centro del tablero. Las blancas tienen entonces 224 movimientos de respuesta posibles, que se reducen a 35 realmente distintos por culpa de la simetría del tablero. (El número total de nudos del tablero apenas si importa, pues carece de sentido abrir un nuevo frente, una nueva línea, lejos de las posiciones en que se ha venido juntando las fichas.) Para cada una de las 35 posiciones iniciales y para cualquier otra posterior, nuestro programa deberá dar un movimiento de respuesta. Investigará cada una de las situaciones con la ayuda de la función de evaluación; y si ésta no ofrece una respuesta inmediata, es decir, una cadena amenazante, la partida proseguirá con los diez movimientos de respuesta de las negras más atractivos.

Bastará con que uno de estos diez movimientos asegure la victoria, lo que se comprobará con ayuda de un nuevo procedimiento, el de "búsqueda del número de la demostración". Le costará algún tiempo. (En el go-moku el número de movimientos con sentido varía muchísimo de una configuración de las fichas a otra.) El algoritmo da prioridad a la búsqueda en las ramas del árbol de decisión para las cuales el contrincante dispone de pocos movimientos viables; el programa se concentra en el análisis de esas escasas posibilidades del adversario y, presto a anularlas, diseña la estrategia ganadora.

El go-moku constituye el tercer juego no trivial que se ha conseguido resolver con ayuda del ordenador. Le precedieron el Connect-Four ("cuatro ganan": las piezas, perforadas, se colocan sobre varillas verticales por las que caen hasta la posición más baja aún no ocupada; se gana cuando se forman líneas de cuatro iguales, en horizontal, vertical o diagonal) y el Qubic (en este caso, el campo de juego es un retículo tridimensional de 4 × 4 × 4 puntos de cruce; pueden ocuparse de manera independiente con el fin de construir líneas de cuatro).

Victoria tuvo que abrirse paso entre 15 millones de posiciones hasta que demostró que las negras ganarán siempre que sean las primeras en salir. La demostración es constructiva, en el sentido de que el programa genera una estrategia ganadora completa. Para ello, basta con dar, para cada configuración del tablero en que les toque jugar a las negras, el

movimiento que deben efectuar, al tiempo que, tratándose del juego de las blancas, se han de considerar todos sus movimientos posibles. Se obtiene así un árbol de búsqueda de unos 150.000 movimientos. Cada hoja de este árbol proporciona a las negras una cadena amenazante que conduce siempre a la victoria.

El trabajo de computación se realizó en una red formada por 11 estaciones de trabajo del tipo Sun-Sparc, en la Universidad Libre de Amsterdam. El cálculo total llevó unos tres millones de segundos de procesamiento, lo que en una sola máquina habrían sido 35 días. En la última versión de "Victoria" participaron varios ordenadores y el tiempo se redujo a una semana.

La variante más larga encontrada por "Victoria" consta de 35 jugadas; con una serie de amenazas de unas pocas jugadas más lleva a la victoria final. Como el programa interrumpe la búsqueda cuando encuentra una solución ganadora, ignoramos si, para determinada configuración, existe realmente un camino más corto hacia la derrota del adversario.

La versión de torneo del programa consta de una tabla de 150.000 jugadas y una función de evaluación, más lo necesario para la representación gráfica de los resultados. Tarda, con un solo ordenador, unos 0,2 segundos en hallar el movimiento idóneo en el árbol de decisiones; si la búsqueda es infructuosa, invierte un segundo en dar con la cadena de amenazas ganadora. En la olimpiada de computadoras de Londres de 1992, "Victoria" obtuvo el primer puesto en solitario. Ganó todas las partidas que jugó con las negras, y la mitad de las que jugó con las blancas. (Victor Allis, Jaap von den Herik y Matty Huntjens.)

El teorema de Fermat, demostrado

Un logro de 350 años de investigaciones matemáticas

Del 21 al 23 de junio de 1993, el Instituto Isaac Newton de Cambridge congregó a los más prestigiosos expertos mundiales en geometría aritmética. La geometría aritmética es una rama moderna de las matemáticas; en ella se establecen relaciones entre los números enteros y objetos geométricos como curvas, superficies, etc. En el transcurso de un seminario de estudios superiores, y ante un público formado por unos cincuenta especialistas, el matemático británico Andrew Wiles, profesor de la universidad de Princeton, presentó sus últimos resultados.

En la comunidad matemática Wiles tiene fama por su discreción y la potencia de sus trabajos. Sus publicaciones no son muy numerosas, pero en ellas se han demostrado conjeturas importantes. Que anunciase tres conferencias seguidas era un buen augurio.

El primer día expuso unas conjeturas de los años 50, y, lentamente, fue sentando las bases del contexto en que se mueven sus resultados. Al final de la sesión, sus colegas empezaron a preguntarse si no habría demostrado la conjetura de Taniyama, estrechamente asociada al teorema de Fermat, y, con ella, éste. Sin embargo, la discreción de Wiles conllevó que el público respetara su laconismo. La conjetura del matemático japonés Yutaka Taniyama fue enunciada en 1955 y precisada, en 1967, por el francés André Weil.

El segundo día, Wiles expuso una serie de resultados sobre curvas elípticas, y demostró que la conjetura de Taniyama es cierta en determinados casos particulares. Su exposición concluyó con una frase lapidaria, acompañada de una sonrisa británica, extraña en él, lo que decía mucho.

Así las cosas, el tercer día se triplicó la audiencia; las cámaras fotográficas empezaron a funcionar y, a lo largo de la sesión, Wiles mostró su resolución de otra parte de la conjetura de Taniyama, ésta vez relativa al comportamiento de las curvas elípticas semiestables.

En el transcurso de estas exposiciones, Wiles hizo un despliegue increíble de recursos, que culminan una serie de largas investigaciones. El seminario concluyó una vez que Wiles abandonó la tiza tras haber escrito en la pizarra que

$$u^p + v^p + w^p = 0 \text{ implica } uvw = 0.$$

Con un fino sentido del humor, alguien del público preguntó para qué valores de p valía su afirmación; Wiles escribió, sin decir palabra, que para $p>1$. Esta es una de las formas en las que puede presentarse la conjetura de Fermat llamada, abusivamente hasta aquel momento, teorema de Fermat.

El auditorio estalló en aplausos, y por medio del correo electrónico se mandaron mensajes al mundo entero, del tenor de éste: "Supongo que ya estaréis enterados de que Wiles ha anunciado que ha demostrado la conjetura de Taniyama para las curvas elípticas semiestables. Este caso particular de la conjetura, gracias a un teorema que demostré hace unos años, implica el Ultimo Teorema de Fermat. En aquella ocasión, probé que la curva elíptica de Frey, construida a partir de una hipotética solución de la ecuación de Fermat, no puede ser modular; es decir, no puede satisfacer la conjetura de Taniyama; por contra, como fácilmente se ve, es semiestable." (Kenneth Ribet, de la Universidad de Berkeley). O de este otro: "Sí, Andrew anunció una demostración del Ultimo Teorema de Fermat, y parece que los colegas la admiten. Hoy por hoy, el manuscrito ha circulado muy poco. Hay personas que están verificando que no haya ningún error; las eventuales correcciones pueden ser mínimas. Pienso que se espera dar una versión definitiva a finales de verano. Creo que Katz ha leído la demostración a fondo y otros tienen el manuscrito desde hace algunas semanas. Estuve presente cuando hizo su anuncio; mantuvo la audiencia en vilo hasta el último momento." (R. L. Taylor, alumno directo de Andrew Wiles).

El entusiasmo mundial se comprende. La conjetura de Fermat era considerada una de las tres principales conjeturas de las matemáticas, juntamente con las de Poincaré y de Riemann. Su historia comienza con el magistrado de Toulouse Pierre de Fermat (1601-1655), uno de los gigantes de las matemáticas. Un siglo antes de que Gottfried Wilhelm von Leibnitz e Isaac Newton sentaran las bases del cálculo diferencial, dio con las ideas principales del cálculo diferencial y obtuvo muchos resultados notables de la teoría de números.

El enunciado de la conjetura de Fermat se presenta generalmente como sigue: la ecuación $u^n + v^n = w^n$, en donde u, v, w son números enteros no nulos y n es un entero mayor o igual que 3, carece de soluciones. Los griegos sabían que la ecuación anterior posee soluciones (de hecho infinitas) cuando el exponente n es igual a 2; por ejemplo, $3^2 + 4^2 = 5^2$. Fermat se preguntó si la ecuación anterior tenía a su vez soluciones cuando n es igual a 3, 4, etc., y acabó por convencerse de que ése no era el caso. En el margen de su ejemplar de la *Aritmética* de Diofanto dejó escrita la frase que ha motivado tres siglos y medio de investigaciones: "Por otra parte, un cubo no es nunca la suma de dos cubos, una potencia cuarta no es nunca la suma de dos potencias



Andrew Wiles, mientras anunciaba sus resultados

cuartas y, más generalmente, ninguna potencia superior a dos es suma de dos potencias análogas. De esta proposición he encontrado una demostración maravillosa, que no cabe en la estrechez de este margen."

Los numerosos intentos fallidos de la comunidad matemática por reencontrar tal demostración han llevado a pensar que Fermat, como tantos aficionados y algunos profesionales, debió de cometer un error. Las Academias de Ciencias siguen recibiendo año tras año múltiples demostraciones erróneas del teorema de Fermat; algún matemático conocido ha anunciado así mismo demostraciones que no han resistido el análisis de sus colegas.

Sin embargo, la vía de investigación que conduce a este teorema ha ido progresando desde principios de siglo. La versión geométrica del problema consiste en detectar los puntos de coordenadas enteras por los que pasa la curva cuya ecuación es la de Fermat. En 1923, el profesor de Cambridge Leo Mordell formuló una conjetura que implicaba que la ecuación de Fermat de exponente n mayor o igual que 3 posee a lo sumo un número finito de soluciones enteras sin divisores comunes.

En 1983, el matemático alemán Gerd Faltings probó la conjetura de Mordell. Así, cuando el género de una curva es superior a uno (es decir, cuando la ecuación de la curva se corresponde con la superficie de una esfera dotada de al menos dos asas), la curva posee únicamente un número finito de soluciones enteras sin divisores comunes.

Según Pilar Bayer, profesora de la Universidad de Barcelona, el factor decisivo que ha permitido llegar hoy a la solución del problema se encuentra en una idea de Gerhard Frey, director del Instituto de Matemática Experimental de Essen. Dicha idea, aparecida en 1986, consiste en asociar a cada hipotética solución u, v, w de la ecuación de Fermat una curva elíptica. Ribet demostró en 1990 que el tipo de curvas a que se llega no puede ser parametrizada por funciones de las llamadas modulares. Por el contrario, la conjetura de Taniyama predice que todas las curvas elípticas son modulares. Así, por reducción al absurdo, si la conjetura de Taniyama es cierta, la ecuación de Fermat no puede tener solución.

Wiles no ha probado la conjetura de Taniyama en toda su generalidad, pero sus resultados son suficientes para abarcar la clase de curvas consideradas por Frey. Puede por tanto concluirse que la ecuación de Fermat carece de soluciones para los exponentes n superiores a 2.

En una sesión extraordinaria de la Academia de Ciencias de París, el 28 de junio de 1993, Jean-Pierre Serre recalcó que, tras el hallazgo de Wiles, el flujo de demostraciones falsas del teorema de Fermat que le son remitidas por la Academia para su examen no cesará, ya que quienes se crean precursores de Wiles no dejarán de reclamar su prioridad.

En el transcurso de la misma sesión de la Academia, inusual por el gran número de jóvenes matemáticos presentes en el auditorio, Gustave Choquet recordaba la promesa que en 1854 la Academia hizo de otorgar una medalla de oro y 300.000 francos de oro a quien lograra demostrar el teorema de Fermat. Ernst Kummer, el artífice de los números algebraicos y creador de la teoría de ideales, probó, mediante sus notables métodos, que la conjetura de Fermat era cierta para los valores primos de n inferiores a 100 salvo, quizá, para 37, 59 y 67, y por ello recibió la medalla en 1858. Si las verificaciones minuciosas del trabajo de Wiles confirman sus resultados, la Academia de Ciencias de París debería remitirle los 300.000 francos de oro. Que se prepare el tesorero, pues los matemáticos confían en que se confirmarán.

Serge Lang, especialista en el tema, cree que la demostración de Wiles es correcta, y Enrico Bombieri, medalla Fields en 1974 y presente en el seminario del Instituto Isaac Newton, ha declarado que la prueba es muy sólida. De momento tiene varios centenares de páginas; ¡el margen del libro de Fermat, en efecto, habría sido insuficiente!

Sotto voce se comenta que la más alta distinción en matemáticas, la medalla Fields, tradicionalmente concedida a matemáticos de menos de 40 años, podría ser concedida a Wiles. Hace tres años la recibió M. Mori, que tenía ya más de 40 años, y Wiles sobrepasa esta edad fatídica sólo en unos pocos meses...

Según Stephen Smale, otro de los laureados con la medalla Fields, la importancia de las conjeturas es discutible. Cuando se trata de puntos aislados en las matemáticas, no suelen ser abordadas con éxito, y éste era, según él, el caso del teorema de Fermat hace diez años. Con posterioridad, notables avances han permitido conectar este teorema con domi-

nios ya explorados. Esta integración armónica en un corpus matemático es la que ha transformado en realidad una quimera.

Efecto túnel cuántico

Partículas magnéticas

Por efecto túnel se entiende en física el paso de un sistema de un estado a otro de manera que se viole, en algún momento de la transición, el principio de conservación de la energía. El paso de un electrón a través de una barrera de energía está clásicamente prohibido, pues el electrón tendría energía cinética negativa mientras estuviese por debajo de ella. Sin embargo, cuánticamente, el principio de indeterminación impide que la posición y la velocidad puedan medirse simultáneamente con precisión absoluta; las expresiones estadísticas de los valores de una y otra será, en el mejor de los casos, inversamente proporcionales. Según la mecánica cuántica, la probabilidad de que la variable posición del electrón caiga bajo la barrera puede ser apreciablemente distinta de cero.

Mediante el efecto túnel se explican procesos que ocurren a escala microscópica en los campos más variados: 1) la ionización de átomos de hidrógeno en presencia de campos eléctricos (física atómica); 2) la emisión de partículas α por núcleos radiactivos (física nuclear); 3) el paso de electrones entre metales separados por un aislante (electrónica); 4) el paso de parejas de electrones, llamadas parejas Cooper, entre dos superconductores separados por un aislante (superconductividad).

En todos estos casos, se entiende que un objeto microscópico, sea un electrón, una partícula α o una pareja de electrones, pasa por efecto túnel a través de la barrera que separa dos posiciones diferentes del objeto de que se trate.

Lo que se observa en las dimensiones atómicas y moleculares, ¿puede también ser observado a otra escala diferente? O dicho de otra manera, ¿puede una variable clásica macroscópica experimentar el efecto túnel?, ¿existe el efecto túnel cuántico macroscópico? La respuesta es afirmativa, pero la probabilidad matemática de que se dé el efecto —de que, por ejemplo, aparezca una persona al otro lado de una montaña sin subirla ni perforarla— es ínfima; si, además, tenemos en cuenta la disipación de energía —el rozamiento del cuerpo con el suelo en el ejemplo anterior—, la posibilidad desaparece totalmente.

Pero, ¿qué ocurre a una escala intermedia? ¿Habrá efecto túnel para sistemas mesoscópicos, cuyo orden de magnitud es varias veces el atómico?

Uno de los descubrimientos más fascinantes en materia condensada de los años ochenta fue la observación por vez primera del efecto túnel cuántico del flujo magnético en superconductores por Voss y Webb.

Con posterioridad, en 1988, Chudnovsky y Gunther predijeron teóricamente que el efecto túnel mesoscópico podía ser observado también en sistemas magnéticos.

El *momento magnético* es la magnitud que determina la interacción de un sistema de cargas eléctricas con un campo magnético exterior, y es proporcional a la suma de su momento cinético orbital y su espín totales; por efecto de esa interacción, el campo tiende a hacer girar el momento magnético hasta alinearlo consigo. Los efectos magnéticos de la materia se deben al momento magnético total de los átomos que componen un material magnético —en concreto, de los electrones de las capas incompletas—.

En una sustancia ferromagnética la interacción interna, o *de canje*, entre los espines tiende a alinear los momentos magnéticos de sus átomos. Esta interacción es isótropa, pero la estructura cristalina del material determina ciertas direcciones en las que es energéticamente favorable el alineamiento. A este fenómeno se le llama anisotropía magnética, y a esas direcciones, *ejes de fácil imanación*. Un campo externo cuya dirección no coincida con la de un eje de fácil imanación deberá aportar la energía suficiente para rotar los momentos alineados hasta que sean paralelos al campo (energía de anisotropía).

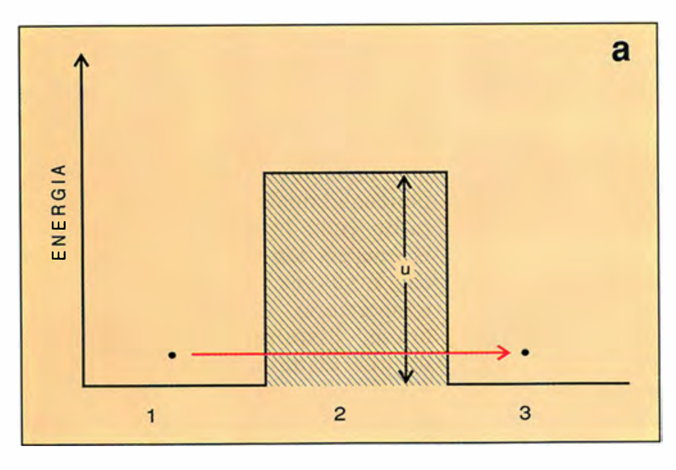
Un cuerpo ferromagnético se divide en *dominios*; dentro de cada uno de ellos los momentos son todos paralelos entre sí, pero la dirección de alineación cambia de un dominio a otro.

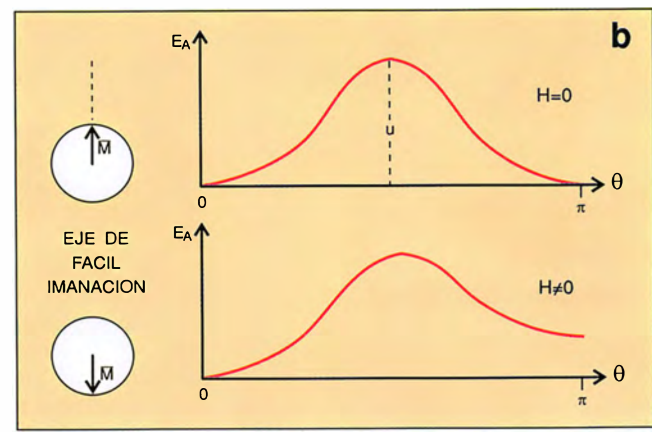
Supongamos que hay varias orientaciones para las que la energía de anisotropía es localmente mínima; entre ellas habrá entonces *barreras de energía* que el momento magnético sólo podrá saltar, clásicamente, si se dispone de una energía mayor que la altura máxima de la barrera. Pensemos, por ejemplo, en una partícula magnética que tenga sólo un dominio y cuya energía de anisotropía sea mínima en dos direcciones opuestas. La activación térmica aporta la energía suficiente para que el momento salte la barrera de energía existente entre las dos direcciones a un ritmo determinado por un factor que es exponencialmente decreciente con la razón entre la altura de la barrera y la energía térmica (la energía térmica, a su vez, es proporcional a la temperatura). Cuando el factor decrece, disminuye la probabilidad de que el momento salte la barrera. En el cero absoluto el factor, y con él la probabilidad de salto, se anulan, es decir, deberíamos esperar un tiempo infinito para que el momento cambiara su orientación.

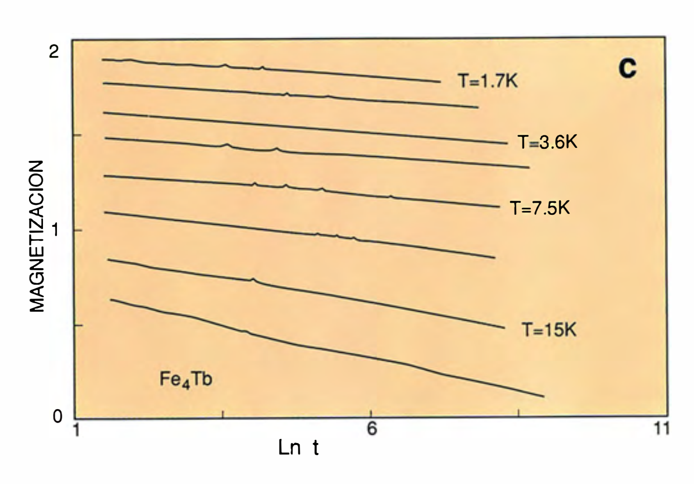
Pues bien, la teoría de Chudnovsky y Gunther predice que, por debajo de una cierta temperatura de transición, el momento puede cambiar su orientación espontáneamente atravesando por efecto túnel cuántico la barrera; la frecuencia de salto, predice también, es entonces independiente de la temperatura; de esa manera, el vector de magnetización (es decir, el momento magnético total) puede, según la teoría, cambiar de orientación a través de la barrera incluso en el cero absoluto.

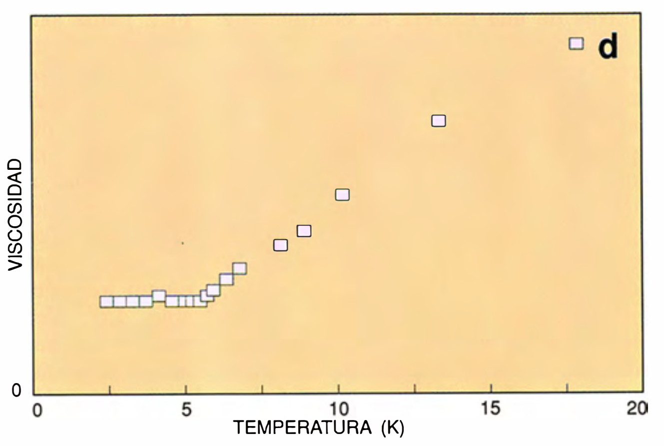
El sistema ideal para contrastar esta predicción sería un conjunto de partículas monodominio con idénticas barreras de energía y que no interactuasen entre sí. Sería muy difícil obtener en la práctica algo así. Afortunadamente, también en sistemas magnéticos complejos, con alta metaestabilidad y una gran distribución de barreras de energía, cabe registrar el efecto túnel magnético.

Un conjunto de partículas monodominio interactuantes entre sí o un cristal ferromagnético con muchos defectos son materiales de este tipo. Si se les aplica un campo magnético, su momento magnético (la magnetización) evoluciona con el tiempo en dos etapas. En la primera, la rápida, el cambio se debe a la rotación de la magnetización local en zonas en las que el campo magnético aplicado ha destruido las barreras. Termina esa fase cuando las rotaciones locales de la magnetización tropiezan con nuevas barreras que el campo no destruye. No hay, por lo tanto, en general, cuando el cambio de campo consiste en la supresión de un campo previamente aplicado o en la aplicación de un campo opuesto, una desimanación completa; quedará una imanación residual, cuyas evolución posterior, más lenta, se deberá a transiciones térmicas por encima de las barreras o a su través por efecto túnel cuántico. Estas transiciones









(a) *Sea un electrón de energía mecánica total cero y una barrera de energía de altura U. Las posiciones 1 y 3 del electrón están clásicamente permitidas, pero no el paso de 1 a 3 a través de la barrera de altura U, pues por debajo de ésta la energía cinética del electrón sería negativa.* (b) *Los dos estados de mínima energía magnética de una pequeña partícula monodominio corresponden a los casos en que el vector M de magnetización es paralelo y antiparalelo al eje de fácil imanación. Arriba a la derecha se representa la energía de anisotropía de la partícula en cuestión en función del ángulo θ que forma M con el eje de fácil imanación, y a la derecha abajo, lo mismo pero en presencia de un campo magnético. La altura de la barrera varía con el campo aplicado.* (c) *Variación de la magnetización remanente en función del logaritmo del tiempo. Esta dependencia lineal en ln t es típica de la mayoría de materiales magnéticos. La pendiente de estas rectas es la viscosidad magnética.* (d) *Variación de la viscosidad magnética S en función de la temperatura. A temperaturas inferiores a los 5 grados kelvin, S es independiente de la temperatura: ésta es la manifestación experimental del efecto túnel de la magnetización*

ocurrirán a un ritmo cuya escala temporal será precisamente la del experimento que se lleve a cabo para detectar la existencia de dicho efecto túnel. Y la detección se basará en la predicción de Chudnovski y Gunther: si los saltos de barrera están activados térmicamente, la relajación del sistema, es decir, la evolución de la magnetización con el tiempo, dependerá de la temperatura; si, por el contrario, son de naturaleza cuántica, es decir, por efecto túnel, la relajación será independiente de la temperatura.

Hemos realizado el experimento. Utilizamos una aleación de Fe_3Tb de 30 angstroms de espesor. Este material está formado, desde el punto de vista magnético, por pequeños microagregados, cada uno de los cuales tiene su propia magnetización.

Variamos el campo magnético que actuaba sobre la muestra y observamos a diferentes temperaturas la evolución de su magnetización remanente.

La magnetización remanente toma, en función del logaritmo neperiano del tiempo, forma de recta. La viscosidad magnética es, por definición, la pendiente de tal recta. La manera en que la viscosidad depende de la temperatura nos indica cuán rápidamente cambia de dirección la magnetización y de qué manera depende de la temperatura el ritmo de cambio.

A temperaturas mayores que 5 grados kelvin observamos que la viscosidad magnética dependía linealmente de la temperatura. Pero por debajo de los 5 °K vimos que se independizaba de ésta; por lo tanto, lo mismo le ocurría a la magnetización.

Esto era exactamente lo que se esperaba si en verdad había efecto túnel de la magnetización. Además, la transición del régimen clásico al régimen cuántico es muy nítida, lo que está también de acuerdo con la teoría, que predice un cambio brusco de régimen si la disipación —el rozamiento— es pequeña.

La perfecta correspondencia entre nuestras observaciones experimentales, en éste y otros muchos materiales ferro y antiferromagnéticos, y las concepciones teóricas clásicas y cuánticas indican que nuestras observaciones son coherentes con la existencia del efecto túnel cuántico de la magnetización. (J. Tejada y X. X. Zhang, de la facultad de física de la Universidad de Barcelona.)

La fusión de los hielos antárticos

John Horgan

El casquete helado de la Antártida no es permanente

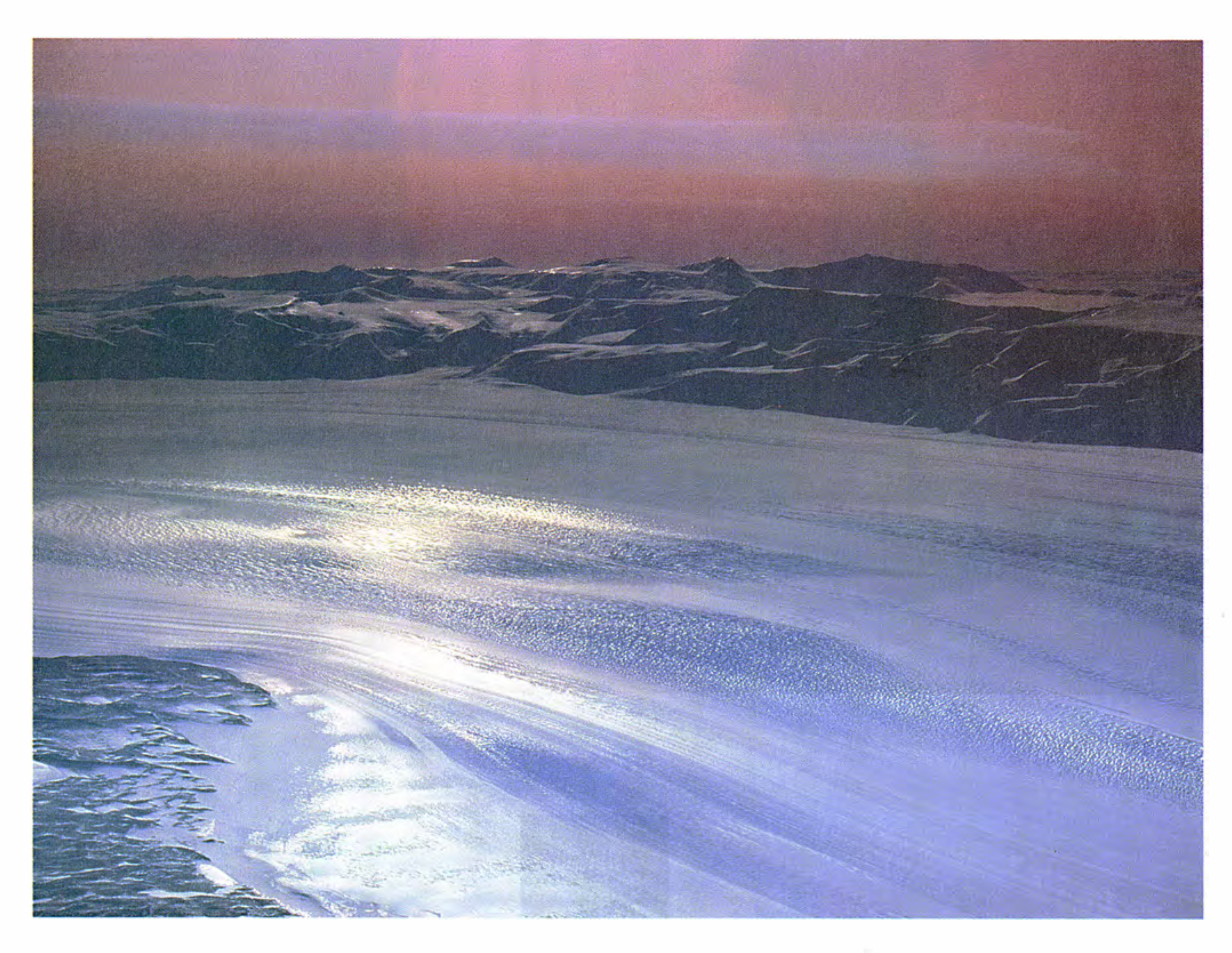
Cada vez hay más indicios de que la capa de hielo que cubre la Antártida ha sufrido drásticas fluctuaciones a lo largo de los últimos millones de años; llegó quizás a desaparecer por entero del continente y lo ha hecho varias veces del tercio occidental. No podemos culpar del fenómeno exclusivamente a los cambios climáticos. Podrían tener algo que decir las erupciones volcánicas atrapadas bajo los hielos.

***EL GLACIAR DE BEARDMORE** fluye desde la meseta antártica hacia la plataforma de hielo de Ross. El glaciar tiene unos 25 kilómetros de anchura*

Se creía, hasta hace poco, que el casquete de hielo se había formado durante una época fría, hará unos 14 millones de años, y que no había experimentado grandes cambios desde entonces. Se admitía también que un mecanismo sencillo mantenía el hielo casi en equilibrio, pese a los cambios climáticos: si las temperaturas aumentaban, el desprendimiento de icebergs y la fusión se avivaban, lo que se compensaba con la evaporación del agua del mar y las precipitaciones. Pero, como dice Gary S. Wilson, ésta es una visión demasiado simple del orden de cosas imperante en la Antártida a lo largo de su historia.

Así, David M. Harwood, Peter N. Webb y su grupo sostienen, por contra, que hace sólo tres millones de años no podía hablarse con propiedad de una capa helada. A mediados de los ochenta hallaron en las Montañas Transantárticas, dorsal rocosa que atraviesa el continente, unos residuos de glaciares poco corrientes. Los depósitos contenían restos fósiles de diatomeas y de cierta haya, común en el hemisferio meridional. Las algas se parecían a las descubiertas en sedimentos de los fondos oceánicos de tres millones de años de antigüedad.

De dichos datos infirieron que, por esas mismas fechas, la capa de hielo



LAS VELOCIDADES VARIAN en un mismo río de hielo de la Antártida Occidental, como muestra esta imagen del Landsat. Las velocidades se distinguen mediante un código de colores; las marcas blancas señalan los puntos de medida. La flecha apunta hacia una depresión que quizá descanse sobre un punto caliente volcánico

se descongeló y, en consecuencia, el continente se transformó en un archipiélago de islas separadas por mares abiertos. Las hayas crecieron en las islas que habrían de convertirse en las Montañas Transantárticas; las diatomeas medraron en cuencas marinas al este de la cordillera. A medida que las temperaturas descendieron y el continente se fue congelando de nuevo, la capa helada y en expansión de la Antártida Oriental empujó las algas hasta las Montañas Transantárticas.

Pero no todos están de acuerdo con ese cuadro. Según George H. Denton, los valles de las Montañas Transantárticas han permanecido congelados, sin vida reseñable, durante 14 millones de años por lo menos. James P. Kennett sugiere que las diatomeas podrían haber llegado a la Antártida arrastradas por el viento.

La teoría de Harwood y Webb ha recibido, sin embargo, algún apoyo. El grupo de Gary S. Wilson y Peter J. Barrett recogió testigos del fondo de un fiordo lindante con las Montañas Transantárticas, y descubrió una capa de cenizas volcánicas que contenía diatomeas semejantes a las descubiertas por Harwood y Webb. Midiendo la desintegración radiactiva de los isótopos de argón presentes en la ceniza, arribaron a la conclusión de que ésta y las diatomeas tenían tres millones de años de antigüedad. En su opinión, son datos que "confirman" la realidad del deshielo.

Wilson reconoce que la cuestión no está zanjada. El clima del Plioceno quizá fue sólo un poco más cálido que el actual; resulta, pues, imprescindible averiguar qué es lo que pasó.

La Antártida Oriental, formada por una placa tectónica propia, ha mantenido según cree la mayor parte de los especialistas su capa de hielo bastante estable desde el Plioceno. La masa continental de la Antártida Occidental es, por el contrario, un mosaico de microplacas y cordilleras geológicamente activas. Su elevación media es muy pequeña; la mayor parte del hielo de la Antártida Occidental descansa sobre suelos que están por debajo del nivel del mar. Dos mares la dominan, el de Ross y el de Weddell; en la parte que mira a tierra están cubiertos por plataformas de hielos flotantes, que actúan, a un tiempo, de colectores y barreras de los glaciares y ríos de hielo que van a parar a ellos. Hay quienes conjeturan que, si los océanos se calentasen y su nivel subiese, y como consecuencia se fundiesen esas plataformas, entonces la totalidad del casquete occidental se desintegraría rápidamente, y el nivel global de los océanos subiría cinco o seis metros.

Reed P. Scherer sostiene que algo así ocurrió hará unos dos millones de años, si no menos, lo que es más probable. Scherer funda su hipótesis en los testigos portadores de diatomeas procedentes del subsuelo de un río de hielo de la Antártida Occidental. Los había extraído, de debajo de un río de hielo, en 1989, un grupo dirigido por W. Barclay Kamb tras perforar mil metros de hielo con agua caliente a presión.

Se sabe que las especies encerradas en los sedimentos existieron desde hace dos millones de años hasta hace 100.000. Scherer se inclina a creer que las diatomeas recogidas por el grupo de Kamb se depositaron en los sedimentos durante un período cálido interglacial de hará unos 400.000 años. "Los registros climáticos y de las profundidades marinas revelan que ése fue un período extraordinariamente cálido", observa.

Según Scherer, de sus datos no se desprende que el hielo de la Antártida Occidental se fundiera nada más que una vez en el último par de millones de años. El modelo de ordenador realizado por Douglas R. McAyeal respalda la posibilidad de crisis múltiples, incluso durante el último millón de años; sugiere, además, que serían rápidas e impredecibles.

Los datos con los que opera el modelo de McAyeal corresponden al comportamiento del clima durante el último millón de años y a la dinámica actual de los ríos de hielo. Un río de hielo se diferencia de un glaciar en que fluye a través de hielo estático o de muy lento movimiento; el glaciar, en cambio, se desliza entre rocas. Necesita, en su avance, agua líquida que lubrique su base. La simulación de McAyeal deduce que el hielo se comportó de



ANTARTIDA ORIENTAL Y OCCIDENTAL, separadas por las montañas Transantárticas. Reaccionan una y otra de manera muy diferente al cambio climático

manera errática a lo largo de ese intervalo y que desapareció en tres ocasiones, hará 750.000, 330.000 y 190.000 años.

Los episodios de fusión no coincidieron con períodos cálidos. Una razón de peso, sostiene McAyeal, es que las fluctuaciones de la temperatura en superficie tardan miles de años en propagarse hacia abajo, a través de las plataformas de hielo. De vez en cuando, una ola de calor podría bastar para fundir la parte inferior de un río de hielo. Y, si se produce una transición de fase en la base, explica McAyeal, se acelera el hielo entero.

Las observaciones recogidas por los satélites revelan cuán errático es el comportamiento de los ríos de hielo en la Antártida Occidental. Seis años se ha pasado Robert A. Bindschadler analizando las fotografías que el *Landsat* ha tomado de los ríos. Midiendo el movimiento de las grietas y de otros accidentes superficiales ha marcado el avance de los ríos; algunos se mueven a más de dos kilómetros por año y pierden más volumen del que ganan con las precipitaciones; otros parecen quietos. Las velocidades varían bastante, incluso en el curso de un mismo río de hielo. El cuadro no coincide en absoluto con un sistema estacionario, apostilla D. Blankenship, para quien el comportamiento a corto plazo del hielo en la Antártida Occidental podría depender menos de los factores externos, climáticos, que de los internos, como las condiciones en la base del hielo.

Hasta hace poco, precisa Blankenship, los geólogos creían que los ríos de hielo se deslizaban sobre una delgada lámina de agua a presión. A mediados de los ochenta, él obtuvo pruebas de que la capa lubricante estaría formada por un espeso limo de agua y roca sedimentaria. Un río de hielo podría acelerarse o detenerse al pasar de un tipo de roca a otro, o si las condiciones en su base variasen. No descarta que pudiera acelerarse incluso por un cambio de acuífero.

A lo largo de los dos últimos años, Blankenship ha encontrado indicios de otro mecanismo que podría desencadenar la aceleración de los ríos de hielo: el vulcanismo bajo el hielo. Las huellas de origen volcánico abundan en la Antártida. La isla de Ross, en particular, está salpicada de conos de cenizas, y en un día claro se puede ver, desde la base McMurdo, el penacho de humo que sale de la cima del monte Erebus, volcán activo que se eleva a 3794 metros. La posibilidad de que en la Antártida Occidental hubiera volcanes velados

¿Están los científicos contaminando la Antártida?

Cada verano austral, la Fundación Nacional de la Ciencia de los EE.UU., la NSC, que corre con el grueso del patrocinio de las investigaciones antárticas, se lleva a unos cuantos periodistas al continente helado, donde les trata a cuerpo de rey. Es que la NSC quiere que los periodistas escriban a su vuelta hermosos reportajes, que luego aprovechará para justificar el dinero público que allí gasta —221 millones de dólares en 1993.

Pero de esas historias que los invitados narran luego, una de las más apreciadas últimamente no es poco embarazosa: los intrusos están dañando a la Antártida. El problema reviste gravedad especial en la base McMurdo, instalada en la isla de Ross, la mayor de las tres estaciones que los EE.UU. mantienen en la Antártida (las otras dos son la base Amundsen-Scott, en el polo Sur geográfico, y la base Palmer, en una península al sur de la Tierra del Fuego).

La población de McMurdo oscila entre las 250 personas en invierno y unas 1200 en verano. Por cada científico que trabaja allí hay unos cuatro civiles y militares que llevan la cafetería, manejan los generadores de energía, pilotan los aviones y los helicópteros, y —actividad cada vez más importante— se encargan de las basuras. Las fangosas calles, la arquitectura de hangares y almacenes, el terreno de escoria volcánica confieren al asentamiento el aire destartalado de una aldea minera.

Los militares fundaron McMurdo a finales de los cincuenta. Por entonces, y luego durante muchos años, se vertían al mar y a tierra todo tipo de desechos. En los últimos años, las quejas de Greenpeace y de otros grupos ambientalistas han provocado que se emprenda una campaña de adecentamiento.

Se ha limpiado el vertedero; la basura se quema o empaqueta en contenedores que se envían a los EE.UU. Los funcionarios de McMurdo sostienen que su programa de reciclamiento es el más exhaustivo del mundo. Pero los problemas no acaban de resolverse. Una pequeña bahía artificial lindante con McMurdo sigue "tan contaminada por hidrocarburos como un puerto de la zona templada", dice John S. Oliver, quien ha recomendado que se bombeen en los sedimentos oxígeno y otros nutrientes, ya que ello favorecería el crecimiento de bacterias capaces de descomponer los hidrocarburos.

Los albañales de McMurdo todavía desaguan directamente en el estrecho. Como dictan las normas internacionales, la NSF empezó hace poco a depurar las aguas residuales antes de enviarlas al mar. "En vez de unos montones flotantes, ahora se ven infinitas pellas", dice Gordon A. McFeters.

El año pasado McFeters observó que el tubo de entrada de agua de la planta desalinizadora para consumo de la base absorbe las bacterias coliformes humanas de las aguas residuales. Teme que virus infecciosos, el de la hepatitis por ejemplo, puedan sobrevivir al proceso de destilación, que sólo calienta el agua hasta 80 grados Celsius, y desencadenen una epidemia.

La solución final de los problemas ambientales sería sustituir a los humanos, que son sucios por definición,

por las corrientes de hielo se le ocurrió a Blankenship mientras sobrevolaba la zona. Observó depresiones circulares de varios kilómetros de diámetro en algunos cursos. Más tarde se encontraría depresiones similares en las imágenes obtenidas por satélite. A diferencia de las grietas y otros accidentes del relieve, estas depresiones no se movían con el hielo, sino que permanecían fijas.

Blankenship contrastó su hipótesis hace un año con los resultados del proyecto ALICE, acrónimo de las iniciales inglesas del denominado "experimento aerotransportado de la litosfera y la cubierta de hielo", proyecto que se llevó a cabo con un avión Twin Otter en el que se habían instalado un magnetómetro, un gravímetro, un radar y un altímetro láser. Estos instrumentos sirvieron para medir el espesor del hielo y determinar la naturaleza de la roca madre. Con Robin E. Bell, Blankenship enfocó los instrumentos a una gran depresión en la capa de hielo de la Antártida Occidental. Se detectó con suficiente claridad, corriente arriba de la depresión, a unos 1200 metros bajo el hielo, una estructura cónica que presentaba la inconfundible huella magnética de la roca volcánica. Además de esta prueba de la existencia de "vulcanismo activo", Blankenship y Bell han hallado extensos depósitos volcánicos bajo la costra helada.

Aun obviando el vulcanismo, cuesta predecir el futuro de la Antártida. Se suele pensar que el aumento de las precipitaciones inducido por el calentamiento global de los últimos cien años está engrosando el espesor del hielo. Una idea que, según Stanley S. Jacobs, carece de fundamento. Faltan datos. "Aún es demasiado pronto para que sepamos qué suerte correría la Antártida en un mundo más calido."

Ellen S. Mosley-Thompson, de la Universidad estatal de Ohio, comparte su punto de vista. Afirma que los testigos de hielo proporcionan sólo estimaciones toscas de la cantidad de precipitación en un año dado, y las mediciones de las precipitaciones a lo largo del continente en tiempo real son escasas y están irregularmente distribuidas. El verano del año pasado Mosley-Thompson voló al polo Sur, y montó allí equipos de medición a largo plazo de las precipitaciones; pero pasarán seguramente muchos años antes de contar con datos que impongan condiciones empíricas reales a los modelos de predicción del futuro de la Antártida. Al fin y al cabo, añade Mosley-Thompson, no se sabe aún predecir el tiempo que hará a la larga en un pueblo; cuánto menos, pues, será posible determinar la evolución del clima de un continente entero.

En este debate entre estabilistas y dinamistas David R. Merchant se inscribe entre los primeros; reconoce, sin embargo, que, a la luz de su pasado, no sería sorprendente que la Antártida sufriese grandes cambios en el futuro. En el momento culminante de la última era glacial, hace 18.000 años, la capa de hielo que cubre el mar de Ross llegó hasta el fondo y detuvo los ríos de hielo que la alimentan. La plataforma helada se desbordó, ascendió hacia los valles que la circundan y enterró el ceniciento médano donde Merchant hace investigaciones de campo. Por otra parte, los testigos de hielo, entre otros indicios, señalan que el hielo de la Antártida Oriental se contrajo durante ese período, sediento de precipitaciones.

Si el calentamiento global persiste —lo que Merchant considera dudoso—, quizás esta secuencia de acontecimientos ocurra de nuevo, pero invertida. Dentro de uno o dos siglos, la capa de hielo de la Antártida Occidental podría desintegrarse. A lo largo de miles de años, el nivel del mar descendería de nuevo a medida que las crecientes nevadas causadas por un tiempo más cálido incrementasen el espesor del hielo en la Antártida Oriental. No son sino cábalas, pero no debe despreciárselas.

con robots, que ni comen ni generan basuras. La NASA está ensayando con técnicas que podrían también aplicarse a la exploración de Marte: se trata de sistemas de telecomunicación alimentados por energía solar y un robot teledirigido que nada bajo el hielo de los lagos —de los pocos lagos— de la Antártida. La pieza de exhibición se llama Dante y anda a ocho patas. Tenía por misión bajar por el cráter del Monte Erebus.

Pero ya durante una prueba en un montón artificial de escoria en Pittsburgh se le rompieron la mitad de las extremidades. Las soldaron rápidamente, y enviaron el robot a McMurdo. Dante volvió a estropearse apenas había iniciado el descenso del cráter; esa vez se le rompió un cable de fibra óptica. "Un éxito sin precedentes", según un portavoz de la NASA. Pero la verdad es que, por ahora, parece que la investigación en la Antártida seguirá en manos de científicos que, humanos a la postre, comen y ensucian.



LA BASE McMURDO presume de tener bolera, gimnasio, capilla, un laboratorio a la última y tres bares.

De cerca

Fotos y texto: Satoshi Kuribayashi

Industria de las abejas

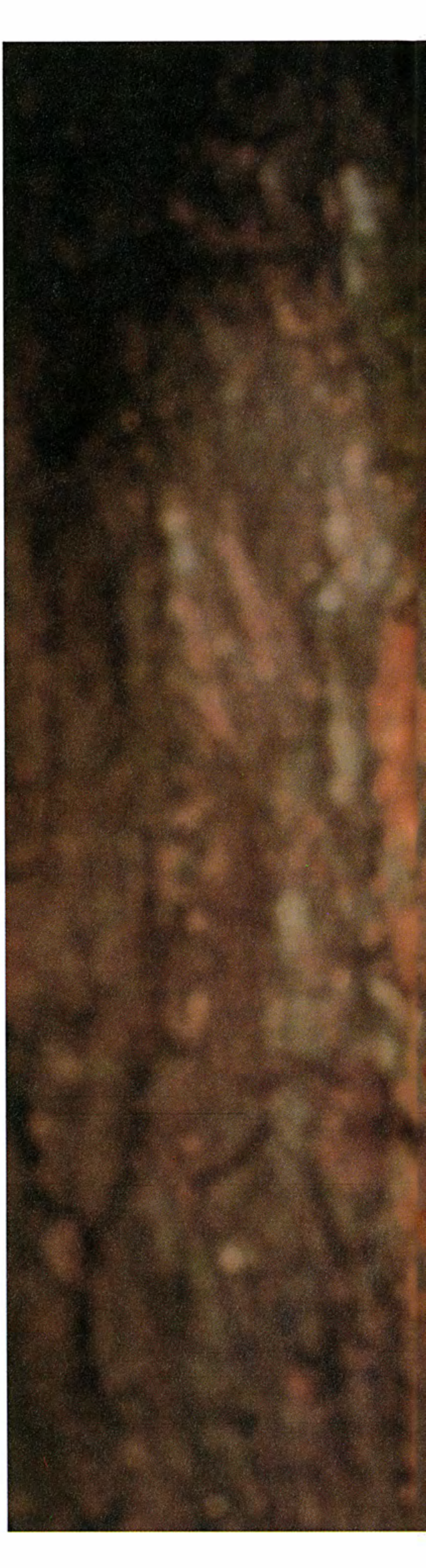


Hace años que la ciencia rescató las abejas del mundo de los apólogos y fábulas moralizantes para comenzar a investigar su defensa del territorio, su estructura jerárquica, el lenguaje con que se comunican, la percepción de los colores, las danzas orientadoras de la fuente de alimentación de la comunidad y hasta su sentido del tiempo.

Sin especial despliegue de medios, podemos observar cómo construyen su casa. Hay una añosa encina mediterránea en mi jardín. En la encina, un hueco; y en él, un nido de abejas cortadoras de hojas. Lo construyeron así. Seccionan la lámina en discos de un centímetro de diámetro y la transportan a su escondite; con ellos preparan el suelo. Para las paredes, los cortes son cuadrados de tres centímetros de lado. Dejan en la sala polen y miel. Sobre esa primera sala, erigen otra, y otra. Ponen, en cada estancia, un huevo.

La fotografía recoge el momento en que acarrea el lienzo de la pared. Pero nadie diría que lo acarrea. Diríase que vuela sobre el fragmento foliar convertido en improvisada alfombra mágica de la literatura árabe. Se tiende, en la fotografía de insectos en vuelo, a utilizar el sensor de infrarrojos, de disparo automático. Para esta ocasión, sin embargo, las interferencias del ramaje y otros obstáculos me aconsejaron recurrir al trípode. Fijé la máquina enfocándola hacia el camino de paso de la abeja. Cuando la tuve delante, disparé yo el obturador.

Foto de la derecha
distancia focal: 80 mm
diafragma: F = 22
exposición: 1/2000 de segundo
película: ISO = 50





Futuro del transistor

Los ingenieros han burlado hasta ahora las barreras teóricas que debieran haber impedido que los transistores fuesen cada vez más baratos y pequeños

Robert W. Keyes

El ordenador con el que escribo este artículo contiene unos 10 millones de transistores. Entre todos cuestan menos que el disco duro, el teclado o el monitor; diez millones de grapas costarían, en cambio, tanto como el ordenador entero. Los transistores son tan baratos porque, a lo largo de los últimos cuarenta años, se ha roturado un número cada vez mayor de ellos en las obleas de silicio. El coste de tal o cual etapa del proceso de fabricación se ha ido repartiendo entre un número siempre creciente de unidades.

Se ha repetido una y otra vez que la miniaturización tiene límites físicos infranqueables, y otras tantas veces los hechos han dado su mentís. En los 46 años de existencia del dispositivo, el número de transistores por oblea de silicio ha escalado ocho órdenes de magnitud.

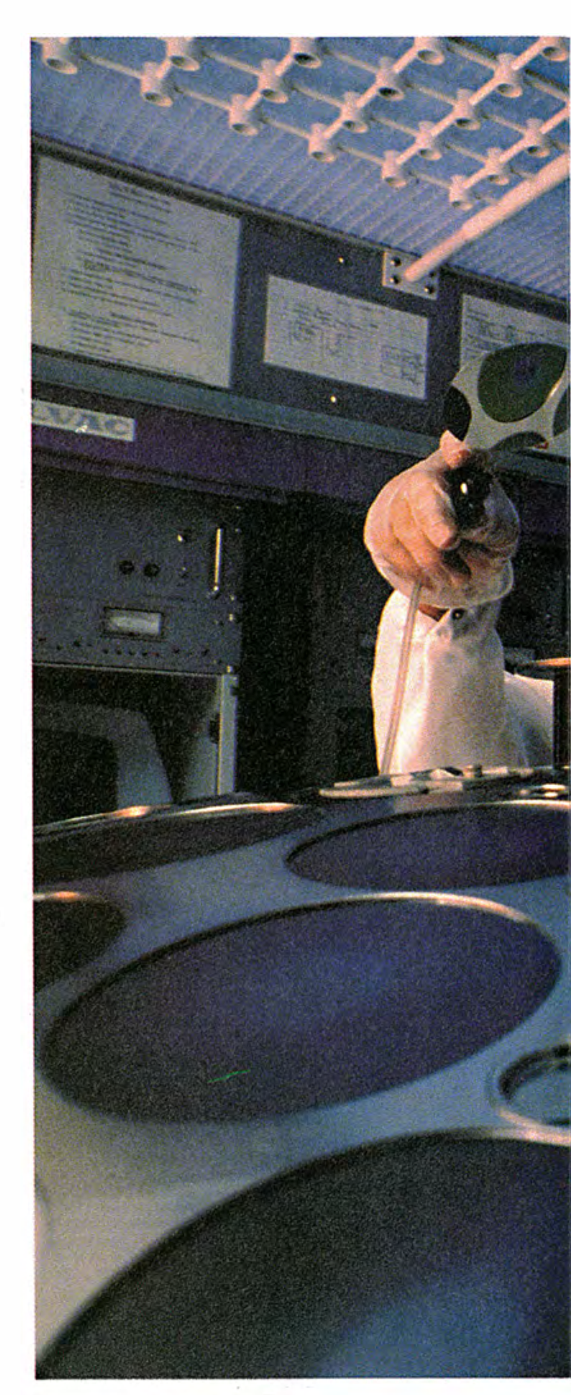
Aparecerán seguramente varios tipos de limitaciones físicas a medida que se achiquen los transistores. Llegará el momento en que ya no sea posible interconectar elementos tan diminutos. O en que el menor tamaño de los circuitos dé origen a campos eléctricos tan intensos que afecten al movimiento de los electrones. En un futuro no muy lejano el transistor podría medir no más de unos cientos de angstroms; a esa escala se haría notar el comportamiento de los átomos individuales, e incluso su mera presencia o ausencia. La reducción de tamaño incrementa la densidad de transistores por pastilla (*chip*), y, por lo tanto, el calor disipado que ha de evacuarse. Las pastillas de hoy desprenden un calor diez veces superior al de una plancha de cocina de superficie comparable; el flujo aún podría aumentar diez veces sin que se sobrepasara la capacidad de refrigeración disponible. Si cayese el tamaño por debajo de la longitud de onda de las radiaciones utilizables, los actuales métodos de fabricación llegarían seguramente a su límite.

ROBERT W. KEYES, del Centro de Investigación Thomas J. Watson de la compañía IBM, es doctor por la Universidad de Chicago y se dedica a la física de los semiconductores y de los sistemas de tratamiento de información. Tiene ocho patentes registradas.

No estará de más repasar el funcionamiento del transistor de efecto de campo, elemento fundamental hoy del procesamiento de datos. Los ordenadores digitales obedecen instrucciones expresadas en código binario, constituido por ceros y unos. El transistor de efecto de campo opera a modo de relé conmutador; tiene, pues, sólo dos estados: activado ("on") y desactivado ("off"), y representa una unidad binaria de información, o bit. A gran escala, las señales de entrada controlan ciertos transistores; se establecen de esa forma conexiones que generan señales en los hilos de salida; éstos, a su vez, transportan las señales a otros conmutadores que producen entonces sus propias salidas, y así sucesivamente. Las conexiones establecidas en el ordenador y el modo en que las señales de entrada se combinan para determinar una señal de salida constituyen una expresión lógica, y una serie de expresiones lógicas determina una palabra de un documento o una entrada de una hoja de cálculo.

El transistor de efecto de campo contiene un canal que interactúa con tres electrodos: la puerta, que controla la conductividad del canal; la fuente, que le suministra a éste electrones; y el drenador, que los recibe al otro extremo. Cada parte está contaminada con átomos de distintas impurezas —dopantes—, que modifican las propiedades eléctricas del silicio.

El transistor se activa cuando la puerta recibe un voltaje positivo, que atrae electrones a la interfase entre el

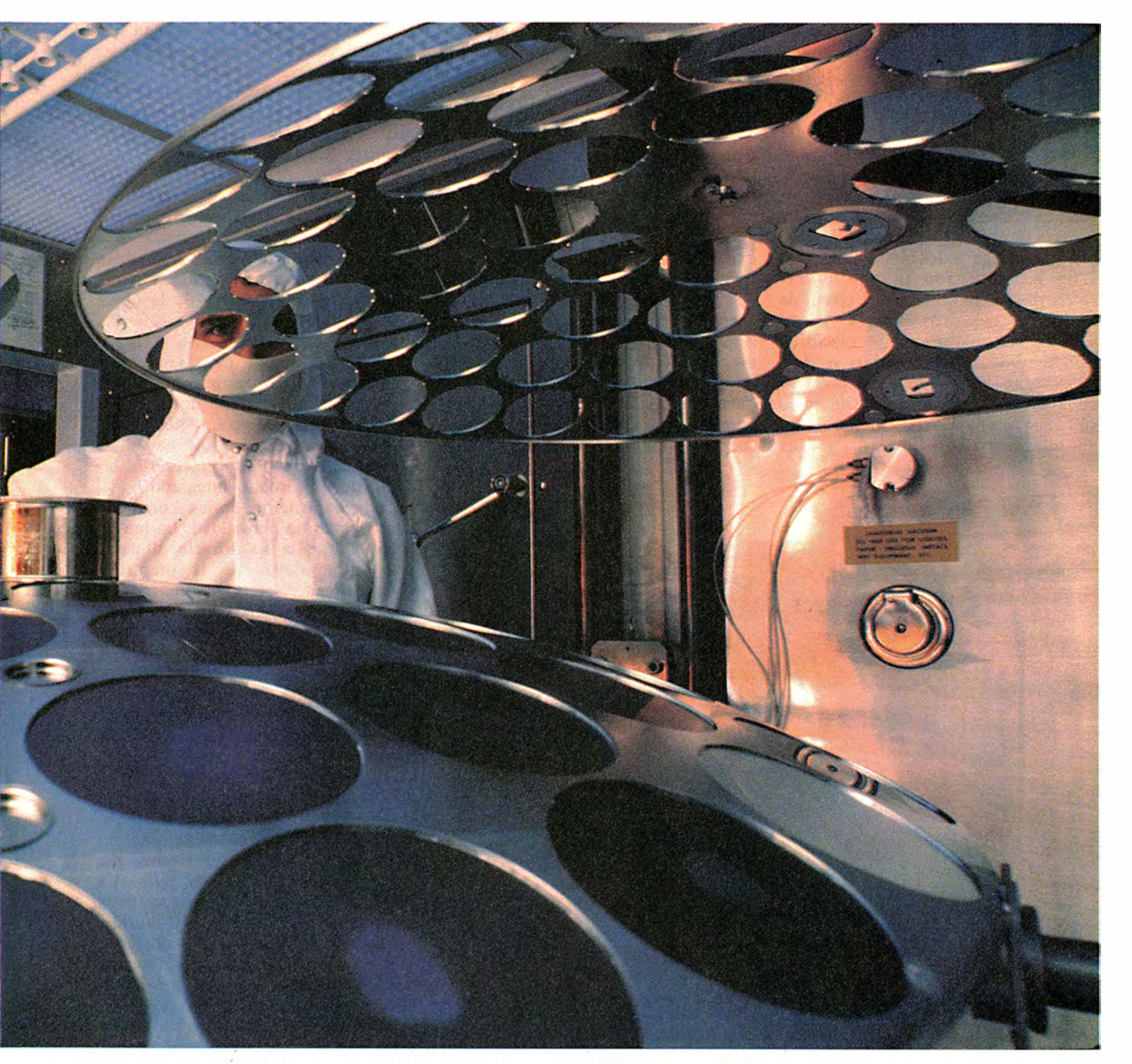


1. LA MINIATURIZACION reparte los costes de fabricación entre los millones

semiconductor y el aislante de la puerta; se establece entonces una conexión entre la fuente y los electrodos del drenador que permite el paso de corriente entre aquélla y éstos. En ese momento se activa el transistor. La conexión persistirá mientras se mantenga el voltaje positivo de la puerta. La señal de entrada que se aplique a la puerta determinará si se establece o no la conexión entre la fuente y el drenador: si se establece, la salida se conectará a uno de los dos voltajes digitales que por regla se adoptan, la toma a tierra; si no, la salida se conectará, a través de la resistencia, al otro: el polo positivo de la fuente de energía.

No debe afectar a los circuitos de transistores el funcionamiento de sus vecinos. Parece que el diseño de los dispositivos de la próxima generación descansará en las mismas nociones de aislamiento, impedancia y demás propiedades eléctricas básicas de los semiconductores y sus conexiones en que los de hoy se basan. Sólo cuando las zonas conductoras disten entre sí alrededor de 100 angstroms empezarán a surgir problemas debidos a fenómenos cuánticos tales como el efecto túnel de los electrones. En los laboratorios se está ya muy cerca de ese límite, a unos 30 angstroms; pasarán quizá diez años antes de que los dispositivos comerciales lleguen a él.

La miniaturización lleva a la intensificación del campo eléctrico. El resultado es una especie de contradicción: los campos tienden a crecer a medida que los electrones recorren trayectos más cortos, pero ese efecto no puede contrarrestarse disminuyendo los voltajes, que han de ser siempre mayores que la energía térmica de los electrones —a temperaturas normales de funcionamiento, 0,026



de transistores de cada una de las pastillas que a cientos se producen en cada oblea. El técnico sostiene una oblea casi terminada. Sus componentes se conectarán por condensación del metal en la cámara de vacío (*primer término*).

electronvolt para el silicio; cuando un semiconductor cambia de estado a fin de cortar el paso de los electrones, su barrera eléctrica ha de elevarse en varias veces esa energía—. El problema térmico se reduce a un mínimo congelando la pastilla, pero no se trata de una solución barata.

Aun así, el campo eléctrico plantearía todavía un problema: seguiría siendo preciso que las señales tuviesen el voltaje mínimo característico de una unión semiconductora —en el silicio, dependiendo del grado de contaminación, entre 0,5 y 1 volt—. Ese pequeño voltaje, si es aplicado en una distancia muy corta, generará un campo eléctrico elevadísimo. Al desplazarse por éste, los electrones adquirirán tanta energía que se estimulará la creación de pares electrón-hueco, los cuales, a su vez, se acelerarán. La reacción en cadena resultante producirá una avalancha de corriente que destruirá el circuito. Este estado de cosas se desencadena cuando los campos sobrepasan los 500.000 volts por centímetro. (En las pastillas actuales se llega a los 400.000.)

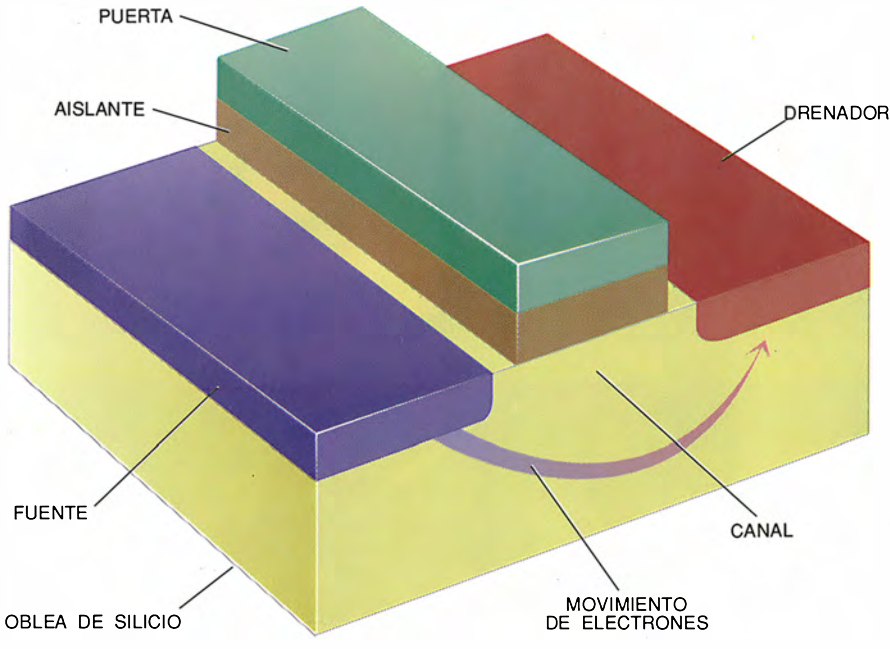
Se ha recurrido a muy diversos artificios para mitigar el efecto de los campos eléctricos intensos. Así, se han diseñado transistores de efecto de campo en los que el campo se desplaza a un lugar donde no perturbe otras funciones electrónicas. Esta no es sino una artimaña entre muchas; todas ellas se basan en un toma y daca con otras características deseables: la sencillez de diseño, la facilidad de fabricación, una vida útil larga, que el funcionamiento sea bueno.

La miniaturización aumenta también el calor desprendido por centímetro cuadrado de silicio, por razones puramente geométricas: las pistas de conducción, y con ellas las pérdidas de energía asociadas, se reducen en una dimensión, mientras que el área ocupada por los circuitos en la pastilla se empequeñece en dos. Dicho de otro modo, a medida que se achican los circuitos disminuye el calor generado por unidad, pero en menor proporción que crece el número de unidades por centímetro cuadrado.

La radiación calórica emitida por los dispositivos alcanza ya los 30 watts por centímetro cuadrado, la que desprendería un material a unos 1200 grados Celsius. Por supuesto, se impide que las pastillas alcancen tal temperatura: los sistemas de refrigeración evacuan el calor tan deprisa como se va produciendo. No hemos agotado aún las técnicas de enfriamiento existentes; con ellas podríamos extraer energía a un ritmo muy superior al que hoy se necesita.

La fabricación impone restricciones a las características y prestaciones de los dispositivos electrónicos que quizá no quepa apreciar con un enfoque puramente teórico. La necesidad de abaratar la fabricación hace que haya que conformarse con que los dispositivos, de una misma oblea o de distintas, no sean del todo iguales. Esta variabilidad, inherente a las técnicas de fabricación propias de la electrónica de estado sólido, es inevitable.

Un transistor se fabrica a partir de un material semiconductor —silicio, por ejemplo—mediante un proceso integrado que consta de numerosas etapas. Se aplican al silicio unas plantillas, denominadas máscaras, a fin de que queden expuestas sólo las zonas de la superficie que se desee, las cuales, seguidamente, sufren diversas operaciones de difusión química, radiación, dopado, pulverización o deposición metálica que van formando el dispositivo o con las que se levantan estructuras auxiliares que luego serán desechadas. Mientras tanto, se construyen otros elementos —resistencias, condensadores, conductores— que sirven para conectar los transistores.



2. EL TRANSISTOR DE EFECTO DE CAMPO, pieza básica del proceso de datos, se asemeja a un emparedado formado por capas de silicio de diferentes dopados. Consta de un canal, una fuente, un drenador y una puerta aislada. Al aplicar a la puerta un voltaje positivo, los electrones se acercan al aislante y establecen por debajo del mismo una conexión que permite el paso de corriente de la fuente al drenador. De esa manera se activa el transistor.

No hay ni una etapa de éstas en la que se no produzcan diferencias: cuesta trabajo enfocar perfectamente la fuente de radiación sobre una oblea grande; la temperatura quizá varíe algo de un punto a otro de la oblea durante el proceso, y el ritmo de las reacciones químicas no será entonces el mismo; la mezcla de gases en una cámara de reacción puede no ser perfecta. Muchos dispositivos resultarán, en consecuencia, defectuosos; la proporción en que los haya por oblea marca un límite práctico al tamaño de un circuito integrado.

Toda exposición óptica comporta cierto grado de borrosidad. La luz de la fotolitografía se difracta al pasar por los agujeros de la plantilla. Cuanto menor sea la longitud de onda que se emplee, menor será este efecto también. La fabricación fotolitográfica se efectuaba a principios de los setenta, cuando se inventó, con luz blanca. Se recurrió luego a luz monocromática emitida por láser. Se emplearon frecuencias cada vez mayores; a mediados de los ochenta se llegó al ultravioleta. Las pastillas de uso comercial más avanzadas se graban hoy en día con luz del ultravioleta lejano. No es tarea sencilla; no lo es la de construir láseres que emitan una radiación tan dura. La próxima generación de dispositivos quizá requiera rayos X. El utillaje es, a cada generación, más costoso.

Y no son éstos todos los factores que encarecen la fabricación a medida que la miniaturización progresa: la colocación mecánica de las obleas tiene que ser más precisa; el control de calidad, al aumentar el número de defectos posibles, más fino; las “sa-

las blancas", aún más limpias, para que en ellas no haya motas —a escalas a su vez menguantes— que podrían destruir un circuito.

A primera vista parece que la miniaturización afecta sólo a las dimensiones superficiales de los dispositivos. La profundidad, sin embargo, también cuenta. Puede servir de recurso —para enterrar los condensadores hasta el borde de manera que quede espacio en la superficie de la pastilla, por ejemplo—; en otras ocasiones, condiciona el diseño. Debe cuidarse la "relación de aspecto" (razón de la profundidad al área superficial). La pastilla es semejante a un emparedado, de muchos pisos a veces. Si el número de capas es excesivo, el proceso de grabación tenderá a socavar la estructura antes de que se la haya podido completar. Estas limitaciones obligan a un control más estricto del espesor de las películas y de la penetración de impurezas en el semiconductor. Con los niveles de control actuales, es factible la implantación de unas 20 capas —es decir, son posibles 20 operaciones de las llamadas de enmascaramiento—.

Las fórmulas utilizadas para el diseño de dispositivos grandes no son aplicables a los transistores. Hay que tener en cuenta los fenómenos inusuales que se producen en aparatos tan sumamente pequeños; como no pueden ser estudiados con exactitud por métodos puramente analíticos, se recurre a modelos de ordenador que simulan el movimiento de los electrones en el interior del transistor.

Se generan sus posiciones en tiempos sucesivos, separados por pequeños intervalos. Por medio de teorías físicas y datos experimentales se calcula la probabilidad de los diversos sucesos posibles. El ordenador guarda en su memoria una tabla con las probabilidades, y mediante un generador de números aleatorios simula el acontecer de los sucesos previstos. Un campo eléctrico, por ejemplo, acelera un electrón, y quizás el choque con una impureza cambie la dirección de su movimiento. La suma de los resultados de miles de estas modelizaciones nos dará una idea de la respuesta del dispositivo.

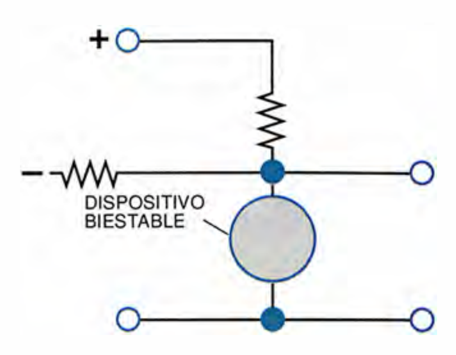
Consideremos el problema, en apariencia trivial, de representar el movimiento de un electrón dentro de un campo eléctrico. Cuando sus trayectos eran más largos, se aceleraba con rapidez hasta el punto en que las colisiones que sufría le sustraían energías del mismo orden que la nueva que le aportaba el campo. Durante la mayor parte del tiempo, pues, la partícula se desplazaba a velocidad constante, y una sencilla ecuación lineal bastaba para regir su movimiento en los modelos. En cambio, al acortarse mucho sus recorridos, no le da ya tiempo a alcanzar una velocidad estable; se acelera continuamente, y las ecuaciones han de reflejar esta complicación.

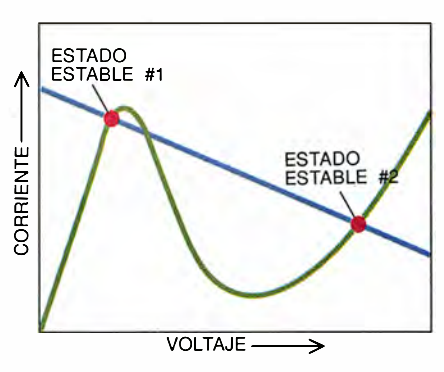
Si hay dificultades al modelar un fenómeno bien conocido, ¿qué podrá esperarse cuando se explore la física de lo extremadamente pequeño? Las simulaciones no pueden ser mejores que los modelos físicos en que se basan, y para refinar éstos sería preciso experimentar en escalas de tiempo del orden de los femtosegundos (10^{-15} segundos).

Hay que conocer más a fondo la física del estado sólido. Cuanto más complejas son las pastillas, más etapas de fabricación son necesarias, y cada una de ellas podría influir en las siguientes. Así, cuando se introducen en un cristal los átomos de una sustancia dopante, tenderán a atraer o repeler a los otros dopantes, o a modificar como sea su movimiento. Pero estas interacciones entre dopantes distintos no se conocen bien todavía, y hay que seguir estudiándolas. En la superficie de un cristal de silicio se producen reacciones químicas que requieren un suministro de átomos de silicio, una especie de corriente de fluido por el interior de la red del sólido; pero, ¿arrastra algo más ese flujo consigo? Esta pregunta no se suscitó cuando se diseñaron las anteriores generaciones de pastillas; por entonces los transistores eran aún lo suficientemente grandes para encubrir estos fenómenos ultramicroscópicos.

Dejando a un lado la posibilidad de que su progreso tenga un límite, el propio transistor ha provocado las cábalas acerca de su sustitución por otras técnicas. Su éxito en los años cincuenta fue tan espectacular, que estimuló un desarrollo explosivo de la física del estado sólido; se descubrieron muchos fenómenos nuevos, que a su vez inspiraron multitud de ideas para la construcción de dispositivos electrónicos. Algunas de esas líneas de investigación han enriquecido el acervo de la ingeniería, pero no han engendrado nada que se haya hecho lugar en el tratamiento de la información.

Hay quienes sostienen que el transistor debe sólo su preeminencia a que fue el primero en salir; los semiconductores, por esa ventaja de partida, se dice a veces, se quedan con el grueso de la investigación y, con ello, tienen garantizado que irán tecnológicamente por delante de sus rivales en una medida que éstos no pueden





3. EL CIRCUITO BIESTABLE realiza la misma función que el transistor valiéndose de efectos no lineales. Se conecta un diodo túnel en la unión de dos electrodos principales y un tercero auxiliar (*arriba*). Si éste suministra una corriente adicional, el circuito pasará de un estado estable a otro (*abajo*). Estos dispositivos no son utilizables en la práctica: no toleran mucha variación en la intensidad de la señal.

acortar. Pero yo creo que el transistor posee cualidades que le mantendrán, por sí solas, en su papel dominante durante los años venideros.

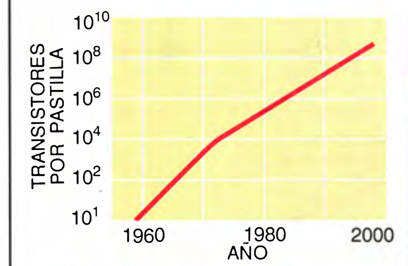
Las tentativas de construir otro tipo de conmutadores han fracasado una y otra vez. Me he preguntado cuál es la causa de tanta frustración. La realización de un dispositivo de nuevo cuño requiere el desarrollo de algunas técnicas de fabricación inéditas. Pero, aun en los casos en que se ha llegado a dominarlas, no se lograba fácilmente que funcionasen a la vez tantos componentes como era necesario.

¿Por qué triunfó tan inmediatamente el transistor? Salta a la vista una de las razones: como su predecesor, el tubo de vacío, tiene una ganancia elevada; es decir, amplifica las señales del tipo de las que se procesan en los circuitos existentes; por su mediación, un pequeño cambio en la entrada genera una gran variación en la salida. La ganancia preserva las señales a medida que pasan por numerosos conmutadores.

Puede que los competidores del transistor se miniaturicen tan fácilmente como éste, pero su ganancia ha sido siempre muy inferior. Consideremos, por ejemplo, el caso de los

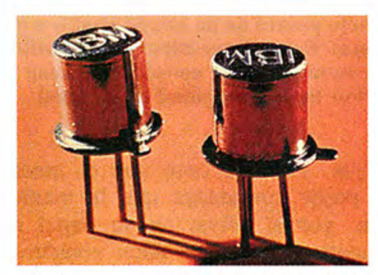
El transistor menguante

En cuanto se compara un conmutador electromecánico de los años cincuenta con una pastilla reciente de 16 millones de bits de memoria (*abajo a la derecha*), salta a la vista hasta qué punto se ha miniaturizado el transistor. Las instantáneas muestran el curso del progreso habido (*en sentido contrario a las agujas del reloj*): el primer transistor de los Laboratorios Bell (1948); transistores encapsulados (1958); transistores del tamaño de granos de sal (1964); pastilla de 2000 bits (1973); placas con 185.000 circuitos y 2,3 megabits de memoria por pieza (1985); y una pastilla de memoria de 64 megabits (1992).





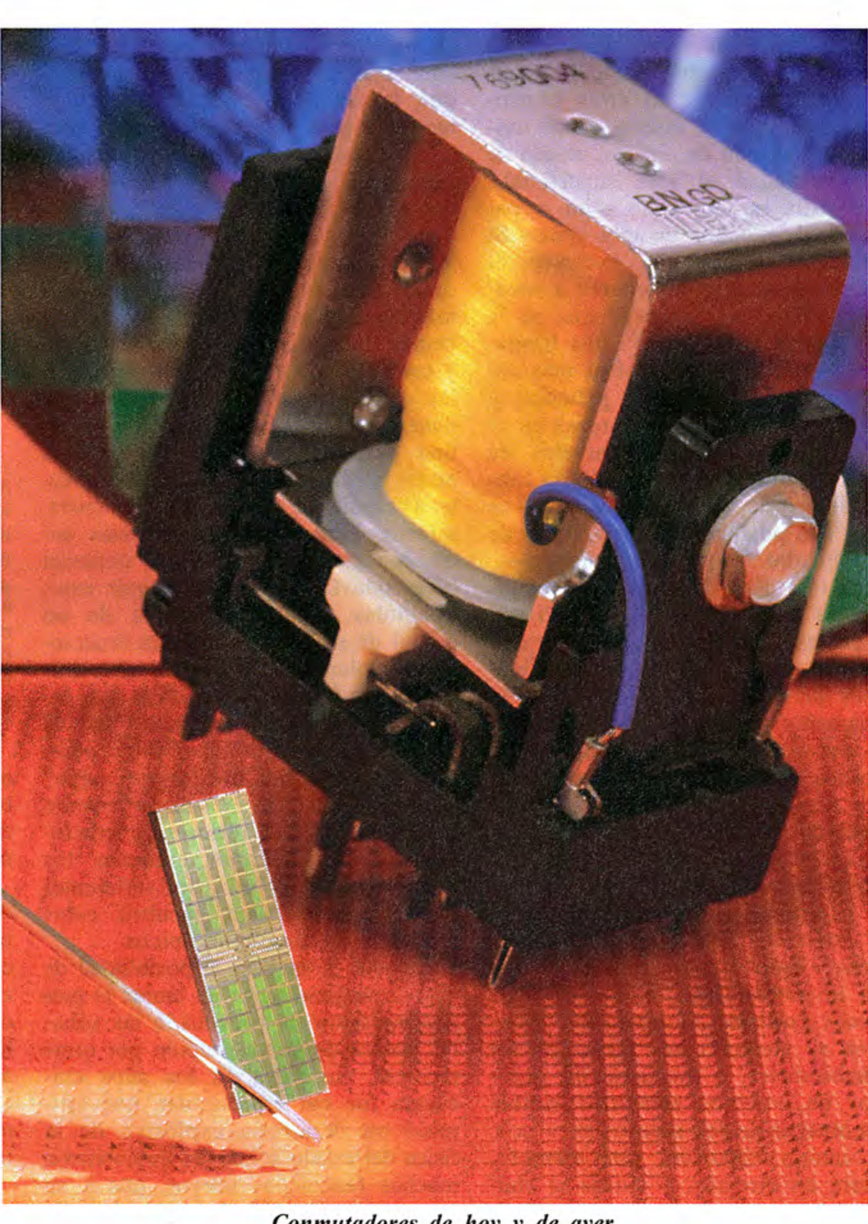
El primer transistor



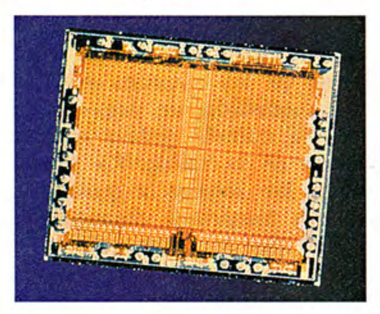
Antiguos transistores comerciales



Transistores del tamaño de granos de sal



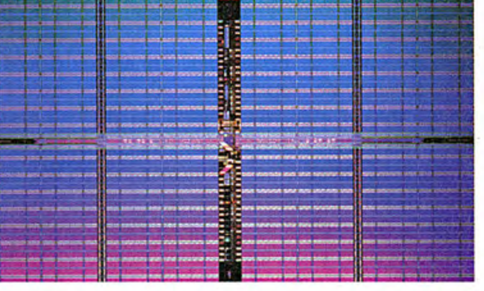
Conmutadores de hoy y de ayer



Antiguos circuitos integrados



Circuitos ensamblados



Pastilla de memoria actual

dispositivos biestables, que calculan funciones lógicas por conmutación entre dos estados estables a los que separa una transición inestable. Este tipo de transición se consigue mediante el diseño de circuitos en los que, para un intervalo de valores, la corriente disminuye cuando aumenta el voltaje. Cualquier ligera perturbación, tal como la recepción de una corriente suplementaria, hará que el circuito pase de un estado estable al otro. Dado que esa pequeña entrada puede ocasionar grandes variaciones en corriente y voltaje, cabe decir que se obtiene ganancia.

Pero es mucho menos útil que la del transistor porque opera en un estrecho margen de tolerancia. El conmutador biestable funciona engañosamente bien en el laboratorio, donde puede sintonizarse con finura el circuito para que opere cerca del punto de transición. Una red de conmutadores no se presta, en cambio, a tan laboriosos ajustes. Como siempre habrá algunos que no funcionen, no podrá construirse ningún dispositivo complejo con ellos. La resistencia negativa no es aprovechable, pues, para el proceso de datos.



4. GRANDE Y DENSA: esta pantalla de cristal líquido, del tipo de matriz activa, muestra que las estructuras electrónicas actuales pueden ser muy complejas aun en superficies bastante amplias. Cada píxel de cristal líquido está controlado por su propio transistor. La resolución es extraordinaria.

Idéntica dificultad mina el desarrollo de los dispositivos ópticos no lineales, en los que la intensidad de haces luminosos desempeña el papel de las corrientes y voltajes de los circuitos eléctricos. También en ellos el funcionamiento depende de que se ajuste finamente el sistema de manera tal que una pequeña señal de entrada altere un delicado equilibrio. (A veces se llama "transistores ópticos" a estos conmutadores, pero esta denominación tergiversa los principios en que se basan los transistores.) Los conmutadores ópticos se enfrentan a un problema todavía más fundamental. La luz, al contrario que la electricidad, apenas interactúa con la luz; sin embargo, la interacción de señales es esencial para el cálculo de funciones lógicas. Las señales ópticas tienen, pues, que ser convertidas en señales eléctricas en un semiconductor; los voltajes que así se producen modifican la respuesta óptica de otro material, y con ello se modula un haz luminoso.

Otro tipo de conmutador propuesto, a veces llamado de interferencia cuántica, se basa en la interferencia de ondas. En el caso más corriente —que sean de radiación electromagnética, de luz—, se las divide en dos componentes, que al principio oscilarán en fase —es decir, sus crestas y valles vibrarán al unísono—; pero si antes de recombinarse siguen trayectos de longitud diferente, la relación de fases entre ellas cambiará. En consecuencia, los valles y crestas de una y otra se anularán entre sí en ciertos puntos y en otros se reforzarán, lo que producirá una serie de franjas brillantes y oscuras. El desplazamiento de las franjas mide la fase relativa del sistema.

Como los electrones también tienen naturaleza ondulatoria, se les puede hacer interferir. Si las dos componentes de una onda avanzan a velocidades iguales por caminos parecidos hacia un punto de encuentro, reconstituirán en él la onda original, mas si sus velocidades son distintas, habrá interferencia entre ellas. La velocidad de propagación de una onda se modifica aplicando un pequeño campo eléctrico a su trayectoria. Con un campo de intensidad adecuada puede hacerse que las ondas componentes se anulen mutuamente; no circulará entonces corriente por el dispositivo.

A primera vista, este funcionamiento es análogo al de un transistor de efecto de campo, que con un campo eléctrico controla, por medio de un semiconductor, la corriente. La diferencia estriba en que el dispositivo de interferencia ha de estar justo en las condiciones correctas: en cuanto el voltaje aplicado sea superior o inferior al debido, dejará pasar alguna corriente. Esta sensibilidad hace que el dispositivo, en vez de restablecer la naturaleza binaria de una señal de entrada degradada, añada su propio ruido. De este modo, los datos que vayan pasando de unos dispositivos a otros se convertirán rápidamente en nada.

El transistor carece de rivales; el futuro de la electrónica digital, pues, está en él. La investigación se emprende de nuevo cada vez que se desciende a escalas más reducidas o se prueban diferentes materiales; en la última, se han tanteado nuevos semiconductores, como el arseniuro de galio y sustancias afines, algunas de las cuales son, incluso, combinables en un solo dispositivo. Las llamadas heterouniones se forman a partir de esas combinaciones, y juntan redes cristalinas con intervalos (*gaps*) de energía distintos. Las redes pueden entrelazarse imperfectamente —se crearán entonces defectos a escala atómica— o estirarse hasta que ajusten unas con otras—se producirá en tal caso una tensión elástica—. Tanto los defectos como las tensiones generan efectos eléctricos secundarios.

Las combinaciones anteriores complican la física del transistor, pero ofrecen una variable con la que jugar para superar los numerosos problemas de diseño que plantea la miniaturización. Por ejemplo, los dopantes aportan electrones al semiconductor, pero también los desaceleran. Para reducir este efecto retardador se alternan capas de dos semiconductores cuyos electrones tengan distintas energías. Los dopantes se colocan en el semiconductor de energía mayor, pero de modo tal que los electrones que donen caigan inmediatamente en las capas de baja energía, lejos de las impurezas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FIELD-EFFECT TRANSISTORS IN INTEGRATED CIRCUITS. J. T. Wallmark y L. G. Carlstedt. John Wiley & Sons, 1974.

THE PHYSICS OF VLSI SYSTEMS. R. W. Keyes. Addison-Wesley Publishing, 1987.

CAN WE SWITCH BY CONTROL OF QUANTUM MECHANICAL TRANSMISSION? Rolf Landauer en *Physics Today*, vol. 42, n.º 10, págs. 119-121; octubre de 1989.

LIMITATIONS, INNOVATIONS, AND CHALLENGES OF CIRCUITS AND DEVICES INTO A HALF MICROMETER AND BEYOND. M. Nagata en *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 27, n.º 4, págs. 465-472; abril de 1992.

THE FUTURE OF SOLID-STATE ELECTRONICS. R. W. Keyes en *Physics Today*, vol. 45, n.º 8, págs. 42-48; agosto de 1992.

Monogamia en la ratilla de pradera

La investigación del comportamiento monógamo de ese mamífero nos ha revelado la existencia de hormonas que pudieran dar cuenta de tal proceder. En esta especie, además, ambos progenitores se ocupan de la cría de los hijos

C. Sue Carter y Lowell L. Getz

La observación de los hábitos de apareamiento y de atención a las crías de los roedores pardos que viven agazapados en la espesura herbácea no parece que sea la forma más propia de buscar las raíces de la monogamia. La mayoría de los humanos podríamos dar fe de la complejidad de las relaciones entre el macho y la hembra. Pero los estudios de la ratilla de pradera *(Microtus ochrogaster)*, una plaga común en el Medio Oeste norteamericano, nos han conducido a un periplo científico extraordinario que arrancó de la ecología y terminó en la exploración de la neuroendocrinología de los lazos sociales. A diferencia de la mayoría de los roedores, las ratillas de pradera establecen lazos de pareja duraderos. Ambos progenitores comparten, además, el cuidado de sus crías. Nuestro trabajo ha servido para poner de manifiesto la importancia de dos hormonas, la oxitocina y la vasopresina, conocidas ya por su papel respectivo en la reproducción y la regulación del agua corporal. De la investigación de las ratillas se desprende su plausible implicación en el desarrollo de la monogamia.

El criterio principal que define la monogamia es una asociación de por vida entre el macho y la hembra. Dentro de esta definición general se esconden varias notas de fácil observación. Los machos y las hembras de las especies monógamas tienden a presentar casi el mismo tamaño y aspecto. Las parejas que se han formado defienden el nido y el territorio frente a los intrusos, y ambos progenitores cuidan de las crías. Los mamíferos monógamos pueden crear complejos grupos sociales que abarcan una familia amplia y descendientes de varias edades. En el seno de esas familias se evita el incesto; las crías adultas no suelen reproducirse mientras vivan con miembros emparentados de la familia. Por último, vale la pena señalar que, aunque se trata de un fenómeno común en las aves, la monogamia es rara en los mamíferos. En una revisión exhaustiva, Devra G. Kleiman, del Parque Zoológico Nacional de Washington, D. C., encontró que sólo alrededor del 3 por ciento de los mamíferos son monógamos.

C. SUE CARTER y LOWELL L. GETZ han venido trabajando en la biología de la monogamia desde dos flancos complementarios, los de su respectiva especialidad: la endocrinología aquélla y la investigación de campo éste. Ambos son miembros de la Asociación Americana para el Progreso de las Ciencias. Carter enseña zoología en la Universidad de Maryland. Getz dirige el departamento de ecología, etología y evolución de la Universidad de Illinois. El artículo que ofrecemos refleja una estrecha colaboración de 15 años.

Advirtamos, sin embargo, que la exclusividad sexual no es signo distintivo de monogamia. Los estudios de la ratilla de pradera, así como los de otros mamíferos y aves, muestran que la monogamia sexual absoluta no se halla asociada necesariamente con la monogamia social. Dicho más claro: las pruebas de identificación individual, por rastreo del ADN, han demostrado que los hijos de hembras de ratilla de pradera tienen un padre biológico que no siempre coincide con el macho que cohabita con la madre. En algunas camadas hemos visto mezclada la paternidad.

Puesto que las ratillas de pradera incorporan las características definidoras de la monogamia, resultan excelentes sujetos para la exploración de sus fundamentos biológicos, al menos tal como existe entre los seres no humanos. Esos animalillos de talla reducida (pesan sólo unas pocas decenas de gramos) se adaptan bien a la cría en el laboratorio. Pero hay algo más importante para el conocimiento de la biología de la monogamia: no todas las ratillas son monógamas. La ratilla de prado *(M. pennsylvanicus)* y la ratilla montana *(M. montanus)* no muestran ninguna señal de esa conducta. Las ratillas de estas dos especies raramente son atrapadas por segunda y siguientes veces consecutivas con la misma pareja y no establecen familias estables; tampoco los machos suelen cuidar de sus crías. Por tanto, la comparación de las ratillas de pradera con sus parientes no monógamos nos puede orientar acerca de las causas de la monogamia.

Una de las primeras sorpresas que produjeron los estudios de las ratillas de pradera fue la observación de que la fisiología reproductora de esta especie se halla regulada por señales sociales. Incluso para entrar en estro (calor sexual), una hembra de ratilla de pradera debe olisquear a un macho. Milo E. Richmond, hoy en la Universidad de Cornell, descubrió que las hembras no poseen los ciclos ováricos que son típicos de los mamíferos no monógamos. En las ratillas monógamas, la hembra ha de encontrar la pareja masculina que induzca el estro.

No todos los machos lo provocan. Ni padres ni hermanos parecen capaces de desencadenar el olisqueo. Quizá se trate de un mecanismo adaptativo destinado a evitar el incesto. La verdad es que lo mismo las hembras que los machos siguen siendo prepúberes mientras permanezcan con su familia.

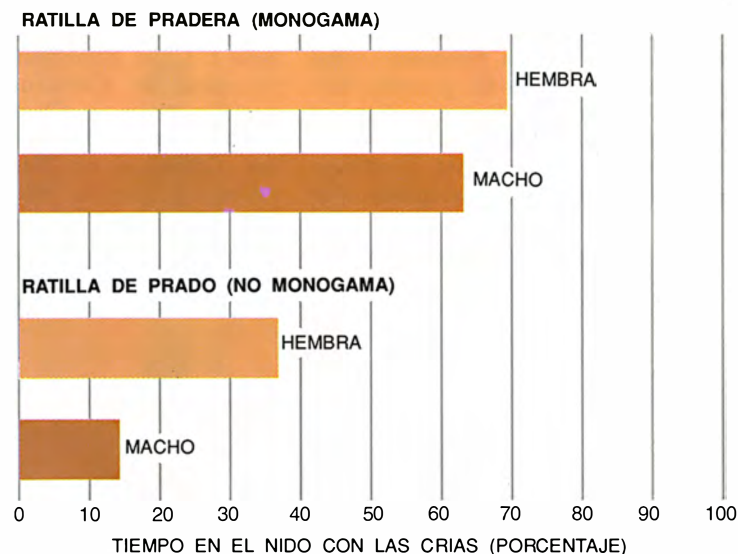
1. LAS RATILLAS DE PRADERA *(Microtus ochrogaster)* se libran a períodos prolongados de apareamiento, con frecuencia más allá del tiempo que se precisa para asegurar la preñez. Estas tandas prolongadas ayudan a consolidar los lazos sociales monógamos.

Al olisquear a un macho apto, la hembra percibe una feromona, señal química que dispara los procesos hormonales precisos para estimular los ovarios y producir el estro.

El órgano vomeronasal constituye el medio sensorial que responde a la acción química de las feromonas. John J. Lepri, actualmente en la Universidad de Carolina del Norte en Greensboro, y Charles J. Wysocki, del Centro Monell de Percepciones Químicas en Filadelfia, comprobaron que la extirpación del órgano vomeronasal en la hembra impedía el inicio del estro. Se ejerce un efecto similar si eliminamos el bulbo olfatorio; cuando lo extirparon en nuestro laboratorio de la Universidad de Maryland, Jessie R. Williams, Brian Kirkpatrick y Burton







2. ATENCION A LAS CRIAS; la que muestran las ratillas de pradera excede con mucho a la que presentan las ratillas de prado, no monógamas. La diferencia se acentúa cuando se comparan los machos: los de las ratillas de pradera están con las crías cuatro veces más tiempo que los machos de ratillas de prado.

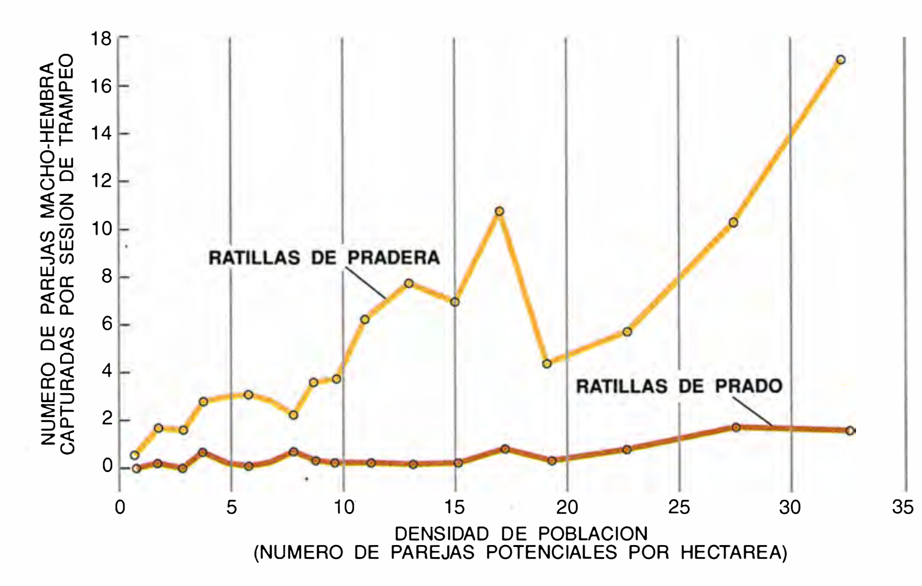
Slotnick alteraron el comportamiento sexual y social de las ratillas de pradera.

También en nuestro laboratorio, Dean E. Dluzen halló que, tras la exposición de la hembra a los olores del macho, los niveles de norepinefrina, un neurotransmisor, y de la hormona liberadora de la hormona luteinizante (HLHL), cambian en cuestión de minutos. Son modificaciones bioquímicas que tienen lugar en el área del bulbo olfatorio que recibe impulsos del sistema vomeronasal. La estimulación del sistema olfatorio y la secreción de HLHL determinan que la glándula pituitaria vierta una carga de hormona luteinizante en el torrente sanguíneo. En conjunción con otros cambios endocrinos, la liberación de hormona luteinizante inicia una cascada de sucesos químicos y nerviosos que estimula la secreción ovárica de esteroides gonadales. Dos de los principales esteroides segregados son el estradiol, un potente estrógeno, y la progesterona.

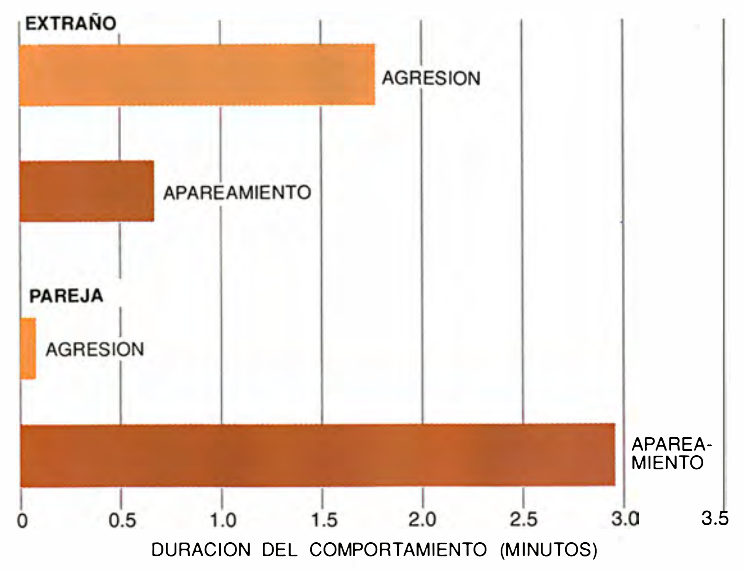
¿Intervienen el estrógeno y la progesterona en el comportamiento monógamo? En colaboración con Janice M. Bahr, de la Universidad de Illinois, buscamos pautas de producción gonadal de esteroides que variasen entre hembras de ratillas de pradera según estuvieran o no en estro, y comparamos los resultados con datos procedentes de especies no monógamas. El nivel de estradiol, hormona esencial para inducir el estro en los roedores, sólo aparecía alto en las hembras de ratilla de pradera enceladas. Consumada la cópula, decaía; una pauta, ésta, semejante a la que muestran los roedores polígamos.

El análisis de las pautas de niveles de progesterona presentó una novedad. En las ratas y las ratillas montanas, no monógamas, la progesterona se descarga en la circulación sanguínea al poco de iniciado el apareamiento; este aumento de la progesterona ayuda probablemente a regular la duración de la actividad sexual, promoviendo la entrada y salida del estro. En las ratillas de pradera, por contra, los niveles de progesterona en sangre no aumentaron hasta muchas horas después de haber empezado el coito.

La secreción retardada de progesterona explicaba una observación ya conocida de antemano: que las hembras de ratillas de pradera en su primer estro copulan durante períodos prolongados. En nuestro laboratorio, Diane M. Witt había comprobado que, cuando la hembra se encontraba en estro natural, machos y hembras continuaban enzarzándose en arrebatos de cópula durante 30 o 40 horas. Este período prolongado de apareamiento contrasta con lo que se observa en las especies monógamas. El apareamiento en las ratillas de prado y montana persiste unas pocas horas; los hámsters dorados, por su parte,



3. LAS PAREJAS MACHO-HEMBRA de ratillas de pradera son capturadas con mucha mayor frecuencia que las parejas correspondientes de ratillas de prado. Además, las mismas parejas suelen ser capturadas de forma repetida. Estos estudios proporcionaron los primeros indicios de monogamia en la ratilla de pradera.



4. AGRESION por parte de las hembras de ratillas de pradera; se pone de manifiesto en las pruebas, de 10 minutos de duración, donde se compara la hostilidad con la preferencia de apareamiento. Las hembras pasan más tiempo atacando a los extraños que apareándose con ellos. En cambio, muestran poca agresión hacia sus parejas.



ya no son receptivos a los 45 minutos de cópula.

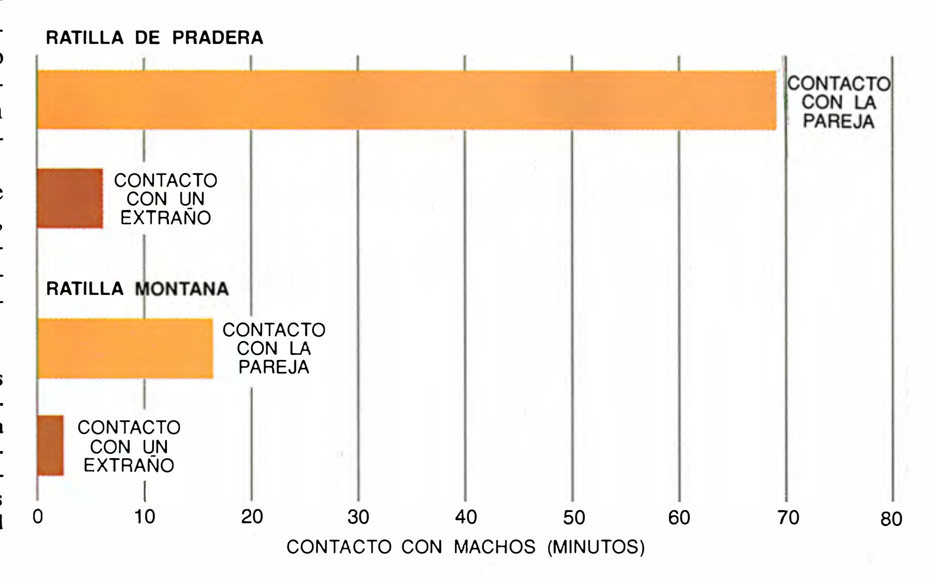
Es de presumir que las prolongadas interacciones sexuales de las ratillas de pradera faciliten la penetración del esperma en el útero y su encuentro con el óvulo. Los estudios de Norman T. Adler, realizados en ratas, han demostrado la influencia de las pautas complejas de comportamiento sexual en la liberación de hormonas y en la capacidad de los espermatozoides de penetrar en el canal reproductor de la hembra y fecundar un óvulo.

Pero la de aumentar las probabilidades de fecundación no es, quizá, la única razón para arrebatos tan duraderos. Una vez se ha iniciado la cópula, las hembras ovulan en un intervalo de unas 12 horas; la gravidez puede acontecer muy pronto. Las ratillas de pradera que se hallan en su primer estro continúan, pues, copulando durante horas después de que se hayan cumplido los requisitos para la fecundación.

Sospechamos que, lo mismo que el hombre y ciertos primates más, las ratillas copulan para anudar lazos sociales de monogamia. El apareamiento dilatado revestiría particular interés para las primerizas, porque necesitan establecer su relación monógama permanente. Alguna prueba en favor de esta hipótesis tenemos de hembras no primerizas, es decir, que ya se habían apareado y quedaron preñadas en otra ocasión anterior. Witt halló que estas hembras experimentadas se entregaban a cópulas breves, de escasos minutos a veces; cuando se ha establecido el lazo social, los machos y las hembras experimentados no necesitan aparearse durante largos períodos.

La interacción social que sigue a la cópula podría constituir un mecanismo de refuerzo de la monogamia en una especie. La influencia recíproca, en las no monógamas, suele ceñirse a un breve intervalo, el de la hembra en celo. A este respecto, Michael H. Ferkin, hoy en Cornell, observó que el macho y la hembra de ratillas de prado no permanecían en contacto físico después de aparearse. En el hámster dorado, que es un animal de hábitos solitarios, descubrió Carter (uno de los autores de este articulo) que la hembra que acaba de aparearse se torna extremadamente agresiva contra el macho; hasta el punto de que intentará matar a su pareja sexual si no se marcha después del coito.

Los mamíferos monógamos, por contra, se muestran muy sociales con su pareja terminada la cópula e incluso durante los períodos no reproductores. Leah Gavish demostró en nuestro laboratorio que las ratillas de pradera suelen rozar con frecuencia a su pareja sexual y permanecen cerca de ella, un calor que no se ex-



5. PREFERENCIA SOCIAL hacia las parejas sexuales que evidencian las hembras de ratillas de pradera; se demuestra mediante pruebas de tres horas. Prefieren el contacto con su pareja al contacto con machos extraños. Las hembras de ratilla montana pasan en realidad más tiempo solas.

tiende a los extraños. Después de aparearse, machos y hembras mostraban una agresividad insólita contra los individuos de su mismo sexo que no pertenecieran a su propia familia. En la naturaleza, este comportamiento se traduce en territorialidad o defensa de la pareja. En el laboratorio nos hemos servido de ese modelo para examinar los procesos fisiológicos responsables de la formación de los lazos de pareja.

Partíamos de la hipótesis siguiente: los procesos hormonales inducidos por la cópula podrían quizás explicar los espectaculares cambios de comportamiento que se manifestaban después del apareamiento. Kerry O'Banion, de nuestro laboratorio, dio el primer paso; estudió la forma en que las hembras escogen a su pareja masculina antes y después de la cópula. En sus experimentos, ató machos conocidos y machos desconocidos en los extremos opuestos de una liza. O'Banion concedía 10 minutos a la hembra para elegir. En su mayoría, las hembras no mostraban ninguna preferencia a la hora de escoger compañero de cópula. Pero si habían vivido ya con un macho, tendían a establecer contacto físico no sexual con el macho conocido y rehuían al extraño. Estos resultados ilustran la importancia del contacto social como un indicio de elección de pareja. También confirman las pruebas de ADN, que revelan que en la naturaleza las hembras de ratillas no presentan una monogamia sexual absoluta.

Más recientemente, Williams examinó las preferencias de las hembras en pruebas que duraban al menos tres horas. Las colocaba en un laberinto en T, bastante grande, donde había tres cámaras. Las hembras podían elegir pasar el tiempo solas o con machos atados en las otras dos cámaras; mediante una videofilmación seguía sus preferencias sociales y sexuales. Tras explorar a la vez al extraño y a la pareja durante 30 minutos, por lo general las hembras elegían al macho familiar.

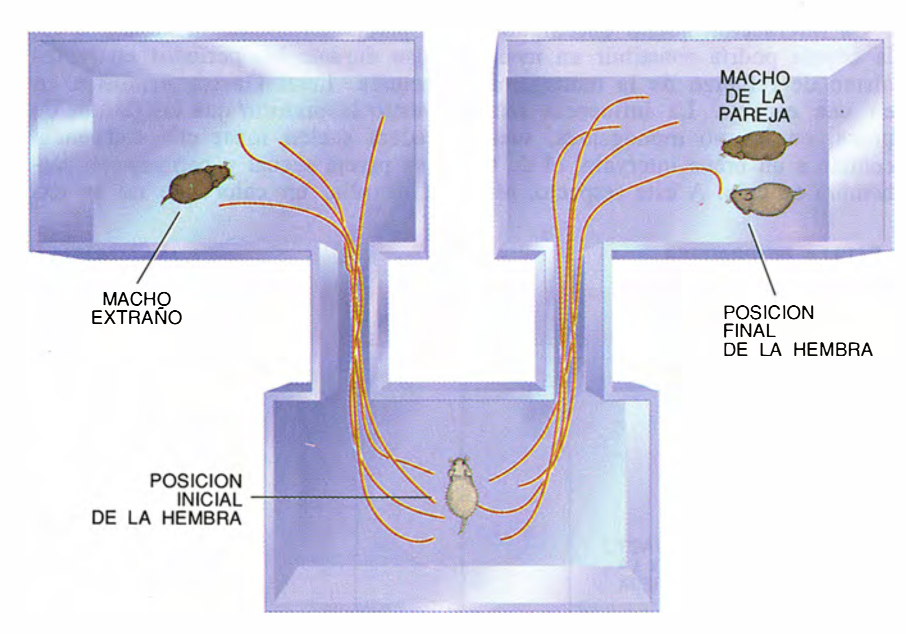
En estudios similares, Williams descubrió que una hembra en su primer estro desarrollaba una preferencia por un macho si se le permitía vivir con él durante al menos 24 horas. Ahora bien, si llegaba a la cópula, la cohabitación producía claras preferencias sociales en sólo seis horas. De lo que se infiere que hay algo en la interacción sexual que acelera el inicio de la elección de la pareja; para nosotros, ese algo son las hormonas o productos neuroquímicos liberados durante la cópula o la cohabitación.

Una pista sobre la identidad de las hormonas nos la ofreció Peter H. Klopfer, de la Universidad de Duke. Había éste averiguado que los lazos sociales entre la madre y sus descendientes estaban asociados con la liberación de oxitocina. Propuso que el compuesto podía ser la hormona del "amor maternal". Niles Newton, de la Universidad del Noroeste, generalizó las observaciones y lanzó la idea de que los lazos maternos y sexuales podrían hallarse condicionados por la secreción de la hormona. La oxitocina se produce en respuesta a la estimulación de pecho y zonas genitales, lo que ocurre durante el apareamiento, el nacimiento y la lactación. E. Barry Keverne y Keith M. Kendrick, de la Universidad de Cambridge, demostrarían más tarde que, en la oveja, lo mismo la estimulación vaginal que los tratamientos con oxitocina aceleraban la formación de lazos madre-hijo. Kerstin Uvnäs-Moberg, del Instituto Karolinska de Estocolmo, ha corroborado que basta a veces el contacto para liberar oxitocina.

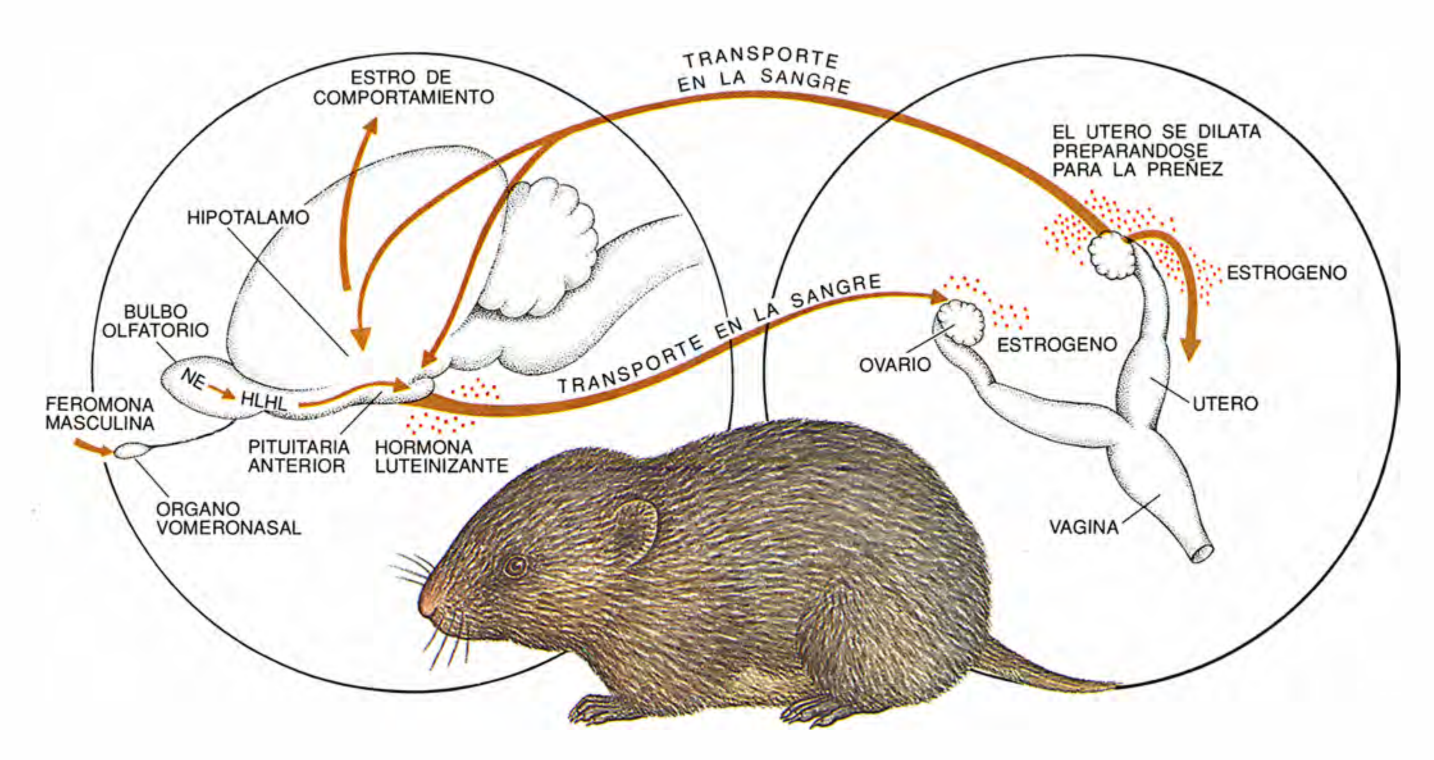
Así las cosas, planteamos la posibilidad de que en las ratillas de pradera la estimulación experimentada durante el apareamiento, o quizá más lentamente mediante el contacto y la cohabitación, liberase oxitocina, y ésta acelerase la formación de lazos sociales entre machos y hembras.

Varios hallazgos recientes han venido a dar respaldo a nuestra hipótesis. Witt inyectó oxitocina en el sistema nervioso central de hembras, tras lo cual éstas se hicieron más sociables y menos propensas a luchar con los machos, en comparación con las hembras que no recibieron oxitocina o con aquellas a las que se les administró la hormona en la circulación periférica. Los efectos sociales positivos de la oxitocina en el cerebro se han confirmado luego en otras especies: el propio Witt halló esa mejora en la conducta social de las ratas, y James Winslow y Thomas R. Insel, del Instituto Nacional de Salud Mental (NIMH), en los monos ardilla.

Williams acometió un examen más directo del papel de la oxitocina. Repitió sus pruebas de preferencia en ratillas de pradera en cuyos ventrículos cerebrales había infundido oxitocina. El ensayo le demostró que las hembras formaban rápidas preferencias por los machos si se hallaban expuestas a la oxitocina durante un período de seis horas. Pero si combinaba oxitocina con una droga bloqueadora de los receptores oxitocínicos, la hormona dejaba de ejercer su efecto social. Resultados que inducen a pensar que la acción de la oxitocina en el cerebro constituye, a buen seguro, uno de los fenómenos fisiológicos responsables



6. PRUEBA DE ELECCION a la que se sometía a las hembras de ratillas de pradera en el laboratorio; revela una preferencia social hacia los machos con los que se habían apareado. Inicialmente, las hembras entran en las jaulas tanto de los extraños como de sus parejas (*lo que se ha representado mediante líneas pardas*) y se aparean con ambos. Sin embargo, pasados 30 minutos, las hembras tienden a permanecer junto al macho familiar.



7. CASCADA HORMONAL que desencadena el estro en la hembra de ratilla de pradera. Empieza cuando la hembra olisquea un macho; el órgano vomeronasal de la hembra percibe las feromonas sintetizadas por el macho, que estimulan el bulbo olfatorio. Se segregan entonces norepinefrina (NE) y hormona liberadora de la hormona luteinizante (HLHL), y se inicia la producción de hormona luteinizante. Esta hormona llega a los ovarios a través del torrente sanguíneo y estimula en ellos la síntesis de estrógeno, que, transportado al hipotálamo, induce allí el estro de la hembra.

del establecimiento de parejas monógamas.

Sabido es que los receptores de una hormona regulan los efectos de ésta en la conducta. Buscamos, pues, las pautas de los receptores de oxitocina en la ratilla de pradera. (Esos receptores están dispersos por todo el sistema nervioso central de los mamíferos.) Witt halló que la distribución de los receptores de oxitocina en las ratillas de pradera difería del modelo que se encuentra en las ratas; las diferencias se acentuaban de manera particular en el interior del sistema límbico, la región del cerebro implicada en el comportamiento sexual y social. Insel y su colega del NIMH Larry E. Shapiro mostraron luego que la distribución de los receptores de oxitocina en las ratillas de pradera y en los topillos de los pinos, otra especie monógama, difería de la pauta observada en las ratillas de prado y montana, que son polígamas. La correlación evidenciada de las pautas de receptores de la oxitocina con la monogamia añade fuerza a la idea que atribuye a la hormona un papel clave en la organización social.

Los lazos anudados en la monogamia fuerzan a la mutua protección de la pareja y del territorio compartido. Las ratillas de pradera que no se han reproducido todavía apenas si se enzarzan en peleas, pero las que sí se han apareado pueden mostrar una exacerbada ferocidad ante la presencia de extraños. Habida cuenta de que la testosterona era la hormona que se citaba como responsable de la agresividad en otros animales, pensamos que sería esa sustancia importante para la reproducción y sintetizada en los testículos la causa de la hostilidad poscópula en las ratillas de pradera. Nicholas Hastings rechazó esa idea en nuestro laboratorio: ni la castración ni las inyecciones de testosterona ejercían efecto alguno en la agresión del macho después de apareamiento.

Ahora bien, si no es la testosterona, ¿cuál será la reguladora de la agresión y la custodia de la pareja? Numerosas pruebas indirectas apuntaban hacia la vasopresina, una hormona de eficacia conocida en el control del contenido hídrico del cuerpo humano. En primer lugar, Craig F. Ferris, del hospital clínico de la Universidad de Massachusetts en Worcester, y Elliott H. Albers, de la Universidad estatal de Georgia, habían involucrado la vasopresina en la territorialidad y en la agresión de los hámsters. En segundo lugar, esta hormona posee una estructura molecular similar a la de la oxitocina; las moléculas difieren entre sí en sólo dos de sus nueve aminoácidos. Ambas hormonas pueden, además, liberarse en circunstancias similares: durante el comportamiento sexual y otras acciones sociales.

Ocurre, sin embargo, que las funciones celulares y de comportamiento de la vasopresina y de la oxitocina tienden a ser antagonistas. Por consiguiente, si cumplía a la oxitocina promover el contacto social dedujimos que podría ser función de la vasopresina producir el comportamiento antisocial o de defensa de la pareja establecida.

Winslow, Hastings e Insel sumaron fuerzas para someter a prueba la hipótesis. En cierto ensayo, inyectaron en los machos antes de aparearse una droga bloqueante de los receptores de vasopresina. Las inyecciones eliminaron la ferocidad añadida que solía seguir a la cópula, aunque sin erradicarla del todo. Pero la droga antivasopresina no refrenaba la agresividad de los machos si se administraba tras el apareamiento. En otro experimento, Winslow e Insel infundieron vasopresina en un macho en presencia de una hembra; redobló su hostilidad hacia los machos intrusos.

La vasopresina podría intervenir también en la atención que el padre presta a las crías. Maryam Bamshad, Melinda A. Novak y Geert J. De Vries, de la Universidad de Massachusetts, acaban de mostrar la

CARACTERISTICA DE LA MONOGAMIA	HORMONA
HEMBRA UNIDA AL MACHO	OXITOCINA (LIBERADA MEDIANTE LA COPULA O EL CONTACTO)
AGRESION ENTRE LOS MIEMBROS DE LA PAREJA DESPUES DEL APAREAMIENTO	VASOPRESINA (ALTO)
TAMAÑO Y ASPECTO SIMILAR DE MACHO Y HEMBRA	CORTICOSTERONA (ALTO) TESTOSTERONA (BAJO)
CUIDADO A LA PROGENIE POR PARTE DEL MACHO Y DE LA HEMBRA	CORTICOSTERONA (ALTO) VASOPRESINA (ALTO)
REGULACION SOCIAL DE LA REPRODUCCION	CORTICOSTERONA (ALTO)

8. RASGOS MONOGAMICOS de la ratilla de pradera puestos en correlación con determinadas hormonas y su concentración corporal. Decimos que los niveles hormonales son altos o bajos en relación con los que aparecen en especies de ratillas estrechamente emparentadas, aunque no monógamas.

correlación manifestada entre conducta masculina y cambios característicos en los niveles de vasopresina, en esa especie.

Los experimentos sobre los efectos de la oxitocina y de la vasopresina en el comportamiento de nuestros animalillos inducen a pensar que las hormonas encierran un significado etológico de vasto alcance. Así, la vasopresina no se limitaría al papel de compuesto homeostático, sino que desempeñaría también la misión general de neuropéptido implicado en instar cierta conducta: la del cuidado de las crías y la defensa propia y de la familia. La oxitocina, cuyo papel en la reproducción está harto comprobado, podría bloquear las acciones primitivas y antisociales, inducidas por la vasopresina, y dejar de ese modo que emergieran los comportamientos sociales. Por último, la monogamia puede ser una expresión refinada de sociabilidad en la que se manifiesta con nitidez la interacción entre oxitocina y vasopresina.

Pese a ese avance en el conocimiento de los mecanismos neuroendocrinos que subyacen al comportamiento monógamo, persiste abierta una cuestión central. Además de las ratillas de pradera, son monógamas especies tan dispares como los perros salvajes, los tities y los tamarinos. ¿Por qué razón fisiológica habrían estos mamíferos, taxonómicamente alejados, de mostrar las notas distintivas de la monogamia?

Podría hallarse una respuesta en el sistema adrenal y su acción en los embriones. El sistema adrenal produce glucocorticoides. Los individuos liberan esos esteroides, en particular la corticosterona y el cortisol, en respuesta al estrés. Pero los sistemas endocrinos de las ratillas de pradera adultas y de los tities segregan cantidades insólitamente copiosas de glucocorticoides, aun cuando no se encuentren sometidos a estrés. Nuestro trabajo con las ratillas nos lleva a plantear la hipótesis de que las interacciones entre las hormonas adrenales y gonadales, durante las primeras fases de la vida, podrían explicar algunas pautas de monogamia que aparecen más tarde.

Nos basamos, en parte, en las investigaciones pioneras de Ingeborg L. Ward, de la Universidad de Villanova. Ward puso de manifiesto los efectos de las interacciones entre esteroides adrenales y gonadales durante el desarrollo de las ratas. La exposición al estrés en el período perinatal, de diferenciación sexual en los mamíferos, influye sobre el desarrollo reproductor subsiguiente; así, las ratas macho que se han visto sometidas a tensión en etapas precoces de su vida tienden a mostrar una pauta de desarrollo feminoide llegadas a la fase adulta, e incluso su propia anatomía genital aparece algo desmasculinizada.

Según parece, los niveles altos de estrés durante el período perinatal inhiben la secreción normal o la acción de andrógenos, las hormonas masculinizantes. Craig H. Kinsley, adscrito ahora a la Universidad de Richmond, y Robert S. Bridges, de la Universidad de Tufts, demostraron que la perturbación perinatal aumentaba también la probabilidad de que las ratas macho se preocuparan, en su momento, del cuidado de sus crías. Por consiguiente, el estrés sufrido por las ratas altera manifiestamente las funciones reproductoras en una dirección que se considera normal en los mamíferos monógamos.

Para nosotros, la actividad adrenal en las ratillas de pradera podría explicar en parte su monogamia. Shapiro e Insel descubrieron que, al poco de nacer, las ratillas de pradera tienen un sistema adrenal insólitamente dinámico. Basta con separar de la madre a las crías breves minutos para que se disparen en éstas los niveles de glucocorticoides. Por contra, las ratillas montanas y las ratas, que no son monógamas, han de sufrir una mayor perturbación para que se avive su actividad adrenal.

En las ratillas de pradera la reactividad de las glándulas adrenales, durante la parte final de la preñez o el período posnatal temprano, podría contribuir a la aparición en el adulto de alguna de las características definidoras de la monogamia, entre ellas la reducción del dimorfismo sexual y una mayor atención al cuidado de la prole. Los primeros ensayos acometidos en nuestro laboratorio por Luci Roberts ofrecen ya alguna prueba: la exposición durante el posparto a niveles de andrógeno superiores a los normales debilitó la tendencia de los machos adultos a ocuparse de las crías. Los trabajos que tenemos en curso investigan la importancia de las interacciones entre los sistemas adrenal y gonadal en el desarrollo de otros componentes de la monogamia.

Aunque podemos ya identificar algunas de las bases fisiológicas de la monogamia en la ratilla de pradera, la causa última (o evolutiva) de tal conducta y su significado adaptativo permanecen envueltos en el misterio. Se da por supuesto que, desde la perspectiva de los hijos, es mejor tener padre y madre que sólo ésta. Idea que, sin embargo, no respaldan los estudios de trampeo de las ratillas de pradera; en un rastreo de

campo de más de 700 familias, las madres solas alcanzaban el mismo éxito en la cría de sus camadas hasta la madurez que el obtenido por las parejas de madre y padre.

Hemos dicho que la exclusividad sexual no constituye un rasgo dominante de la monogamia en las ratillas de pradera. Pero eso plantea también otra cuestión evolutiva. El cuidado de la prole en los mamíferos, y en especial en nuestros animalillos, representa una inversión importante en tiempo y energía. Se suele admitir que la dedicación paterna es un beneficio de la monogamia porque los machos pueden aumentar su propio éxito reproductor al cuidar de su progenie. Quizás esta estrategia representa una función probabilística. Los machos monógamos aumentan su eficacia biológica en general al aceptar la carga que supone cuidar algunas crías que no son las suyas.

No están claras las implicaciones teóricas de tal observación. Las ratillas de pradera que hemos estudiado en Illinois viven en un ambiente que proporciona abundantes cantidades de alimento, agua y otros recursos esenciales. Creemos que la monogamia se desarolló entre ellas en tiempos menos feraces, cuando la monogamia podría ofrecer beneficios adicionales no evidentes en los hábitats que hemos examinado. Estamos ahora comparando las ratillas de pradera de Illinois con las que viven en un ambiente mucho más riguroso de Kansas.

A menudo, nuestras investigaciones nos llevan a plantearnos si lo que vamos descubriendo podría aplicarse a la especie humana. La monogamia de los primates del Viejo Mundo y los humanos toma probablemente una forma distinta de la que se describe aquí para las ratillas. Pero hay ciertos paralelismos. La exclusividad sexual se rompe a veces en las parejas monógamas humanas. Los animales, humanos incluidos, se definen quizá mejor por la selección de pareja social que por su elección de pareja sexual.

Nuestra investigación trae también a primer plano el significado general del comportamiento social positivo y el de los lazos, tan importantes al menos para la especie humana como para las ratillas de pradera. El corte de esos lazos en los humanos, por pérdida de un hijo, un padre o cónyuge, puede acarrear consecuencias desastrosas para la salud mental y física. No conocemos bien, sin embargo, la fisiología del comportamiento de la formación de estas relaciones en la especie humana. A decir verdad, no se ha comprendido que los lazos sociales posean un trasfondo biológico.

Uno se siente tentado a suponer que la oxitocina y la vasopresina podrían afectar también al comportamiento humano. Pero no es fácil poner de manifiesto el papel de estas hormonas, ni siquiera en los animales, razón por la cual quedan muchas cuestiones en el aire. En buena medida, la investigación, por lo que al hombre concierne, se limita a sacar correlaciones entre cambios en los niveles hormonales en sangre y el comportamiento.

La escasez de datos consiguiente obliga a preguntarse por los efectos clínicos de estas hormonas, de frecuente uso en terapéutica. La oxitocina se prescribe para inducir contracciones uterinas en el parto; la vasopresina, para el tratamiento de los niños con problemas de nicturia. Acciones que afectan indirectamente los niveles hormonales, como alumbrar mediante una sección cesárea o dar el biberón en vez del pecho, pueden incidir, asimismo, en la cantidad de oxitocina recibida tanto por la madre como por el niño.

Por haber creído que ambas hormonas actuaban fuera del cerebro (útero, pecho y riñón) se prestó poca atención a las secuelas conductuales de tales tratamientos y prácticas. Pero ahora sabemos que la oxitocina y la vasopresina actúan en el sistema nervioso central. Descubrimientos procedentes de la investigación animal, como los que aquí se describen para las ratillas de pradera, debieran animar a la comunidad biomédica a que observara con más atención los efectos potenciales de estas potentes hormonas sobre el comportamiento.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE COMPARATIVE PSYCHOLOGY OF MONOGAMY. D. A. Dewsbury en *Nebraska Symposium on Motivation, 1987*, vol. 35, dirigido por D. W. Leger, páginas 1-50; 1988.

SOCIAL ORGANIZATIONS AND MATING SYSTEM OF THE PRAIRIE VOLE, *MICROTUS OCHROGASTER*. L. L. Getz, B. McGuire, J. Hofmann, T. Pizzuto y B. Frase en *Social Systems and Population Cycles in Voles*. Dirigido por R. H. Tamarin, R. S. Ostfeld, S. R. Pugh y G. Bujalska. Birkhauser Boston, 1990.

OXYTOCIN AND SOCIAL BONDING. C. S. Carter, J. R. Williams, D. M. Witt y T. R. Insel en *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 652, páginas 204-211; 1992.

El autismo

Los autistas padecen una alteración biológica. Aunque incurables, es mucho lo que puede hacerse para que lleven una vida más adaptada

Uta Frith

Hay una imagen estereotipada para referirse al autismo: la del niño encantador protegido por una campana de cristal. Durante décadas, muchos padres se han aferrado a esa estampa, confiados en que algún día se hallara el mazo que hiciera añicos la barrera invisible. Se han propuesto varios tratamientos, pero ninguno se ha mostrado eficaz. La campana permanece intacta. Quizás haya llegado el momento de romper con esa imagen, para poder entonces formarnos una idea real de la mente de los autistas.

Las investigaciones psicológicas y fisiológicas han demostrado que no viven en un mundo interno de especial riqueza, sino que son víctimas de una alteración biológica en virtud de la cual su mente difiere notablemente de la de un individuo normal. Mas, para fortuna de todos, los autistas no están fuera del alcance de las relaciones afectivas.

Podemos, pues, construir un mundo más hospitalario para los autistas, del mismo modo que facilitamos las cosas para las personas invidentes. Para ello, se impone conocer en qué consiste el autismo, tarea nada fácil. Nos podemos poner con la imaginación en la piel de los invidentes, pero no hay forma de doblarse en autista. Desde hace siglos se sabe que la ceguera se debe, por lo común, a una alteración periférica, a nivel sensorio-motor, del sistema nervioso. Por contra, es reciente la percepción de que el autismo expresa un alteración central del nivel superior de procesamiento cognitivo. Lo mismo que la ceguera, el autismo persiste a lo largo de la vida y responde bien a los esfuerzos especiales de educación compensadora. Se pueden cosechar éxitos importantes, aunque también provocar efectos secundarios negativos de ansiedad, pánico y depresión. Se puede avanzar mucho en el campo de la prevención de las dificultades. Sin embargo, el primer paso será siempre entender la naturaleza de la minusvalía.

UTA FRITH trabaja en la unidad de desarrollo cognitivo del Consejo de Investigaciones Médicas. Inició su formación en su Alemania natal y se doctoró en psicología por la Universidad de Londres. Ha estudiado el autismo, la dislexia y el desarrollo de la lectura. Es autora, entre otros escritos, del libro *Autism: Explaining the Enigma*.

El autismo existía mucho antes de que le diera nombre su primer investigador, Leo Kanner, de la Clínica Psiquiátrica Infantil Johns Hopkins. Kanner publicó su artículo clásico en 1943, tras observar a 11 niños que le parecieron formar un grupo diferenciado y homogéneo. Todos tenían en común cuatro rasgos: preferencia por el aislamiento, insistencia en las actividades conocidas, gusto por las rutinas elaboradas y ciertas habilidades que resultaban paradójicas en personas con limitaciones.

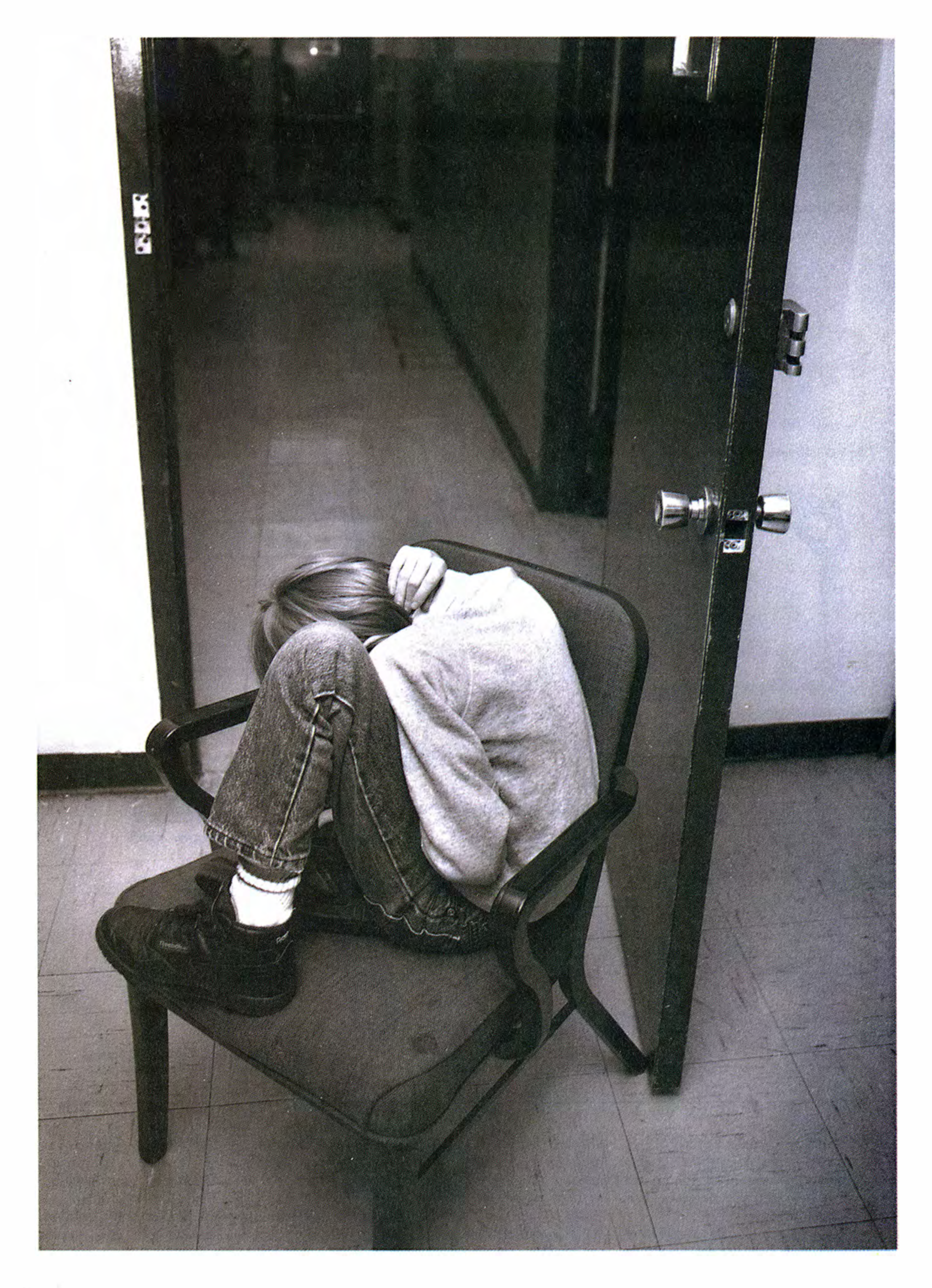
Mientras tanto, y sin relación con lo anterior, Hans Asperger, de la Clínica Pediátrica Universitaria de Viena, preparaba su tesis doctoral sobre la misma tipología. Utilizó también la palabra "autismo" para designar las notas características del trastorno. Kanner y Asperger tomaron el nombre de la psiquiatría de adultos, donde aludía a la progresiva pérdida de contacto con el mundo exterior experimentada por los esquizofrénicos. Los niños autistas parecían sufrir esa falta de relación con el entorno desde edades muy precoces.

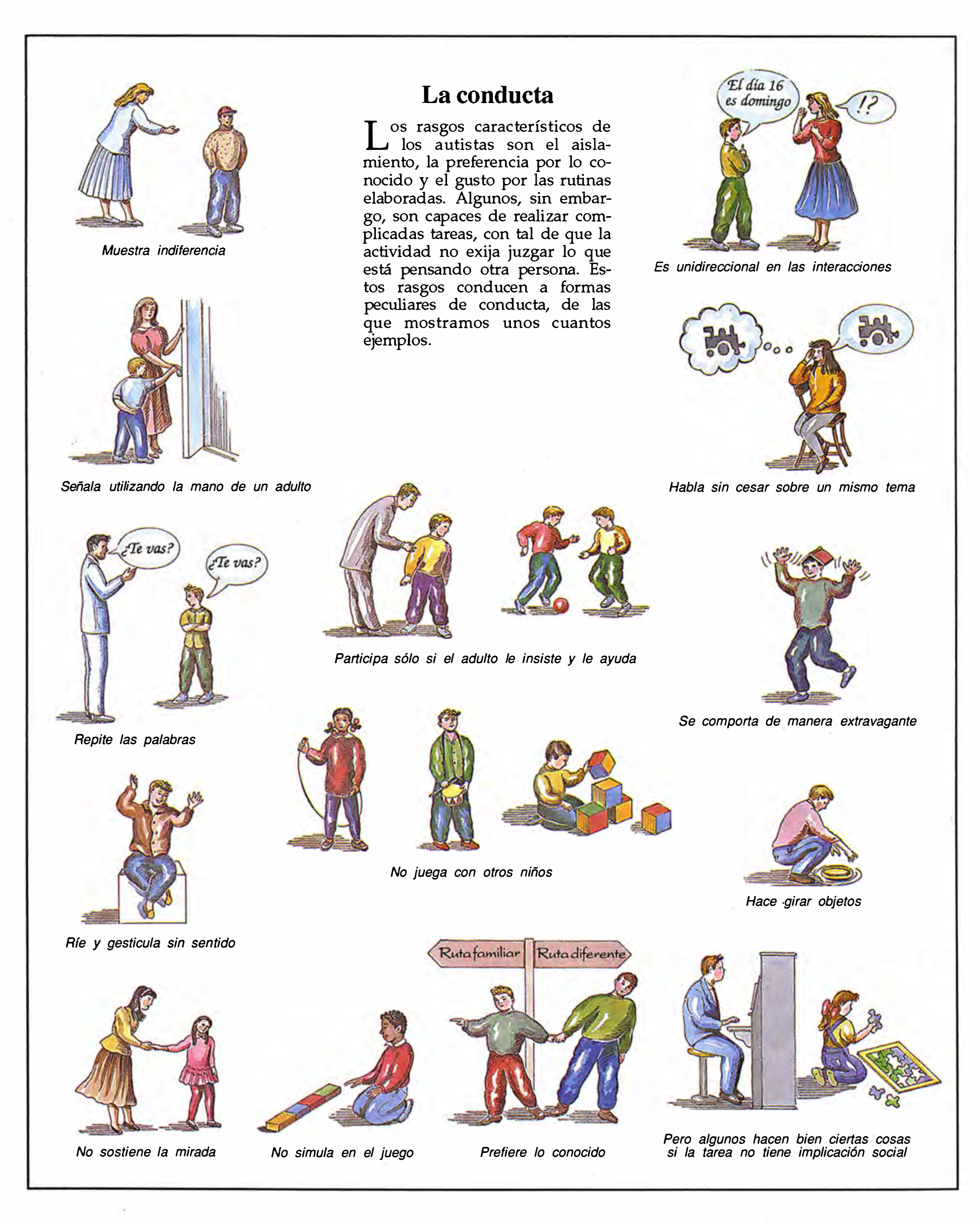
El primer caso de Kanner, Donald, se convirtió durante bastante tiempo en prototipo para el diagnóstico. Resultó evidente desde sus primeros años que el niño no era como los demás: a los dos, tarareaba ya y cantaba nítidamente melodías de oído. Pronto aprendió a contar hasta 100 y a recitar el alfabeto y las 25 preguntas y respuestas del catecismo presbiteriano. Pero tenía también la manía de hacer rodar los juguetes y otros objetos; en vez de divertirse con sus juguetes como los otros niños, se dedicaba a ordenar las canicas y otros objetos en grupos de diferentes colores, si no los lanzaba contra el suelo disfrutando con el sonido del rebote. Para él las palabras tenían un significado literal e inflexible.

Kanner conoció a Donald cuando éste había cumplido cinco años. Vio que no prestaba atención a la gente de su alrededor; si alguien se interponía en sus actividades solitarias, no se enfadaba nunca con la persona en cuestión, pero apartaba impacientemente la mano que le importunaba. Su madre era la única persona con quien tenía algún contacto significativo, y tal vez debido al enorme esfuerzo que derrochaba en compartir actividades con su hijo. A la edad de ocho años, la conversación de Donald se ceñía principalmente a la formulación de preguntas repetitivas. No se relacionaba con los demás si no era para colmar sus necesidades y caprichos inmediatos, y ese contacto cesaba en cuanto se le respondía o concedía su solicitud.

Otros niños descritos por Kanner no hablaban. Y los que lo hacían no se comunicaban realmente, sino que se servían del lenguaje de forma muy peculiar. Paul, de cinco años de edad, repetía como un loro lo que oía: "Quieres un caramelo" decía, cuando lo que deseaba decir era "Quiero un caramelo". Tenía la cos-

1. AISLAMIENTO del niño autista. Ese rasgo sirvió para crear la imagen del niño encerrado en una campana de cristal. Creíase erróneamente que, rompiendo la campana, emergería un niño normal. La fotografía se ha tomado, como las restantes del artículo, salvo la última, en la Asociación para Niños Autistas de Manhattan.





La conducta

Los rasgos característicos de los autistas son el aislamiento, la preferencia por lo conocido y el gusto por las rutinas elaboradas. Algunos, sin embargo, son capaces de realizar complicadas tareas, con tal de que la actividad no exija juzgar lo que está pensando otra persona. Estos rasgos conducen a formas peculiares de conducta, de las que mostramos unos cuantos ejemplos.

Muestra indiferencia

Es unidireccional en las interacciones

Señala utilizando la mano de un adulto

Habla sin cesar sobre un mismo tema

Repite las palabras

Participa sólo si el adulto le insiste y le ayuda

Se comporta de manera extravagante

Ríe y gesticula sin sentido

No juega con otros niños

Hace girar objetos

No sostiene la mirada

No simula en el juego

Prefiere lo conocido

Pero algunos hacen bien ciertas cosas si la tarea no tiene implicación social

tumbre de repetir, casi a diario, "No tires al perro por la ventana", una expresión cuyo origen su madre remontaba a un antiguo incidente con su perro de peluche.

A los veinte años de su primer encuentro con el grupo, Kanner abordó la evolución de aquella muestra originaria. Unos parecían haberse adaptado a su entorno social mucho mejor que otros, aunque persistía su incapacidad para comunicarse y establecer relaciones; seguían obstinados con sus formalismos. Dos condiciones necesarias, aunque no suficientes, de la mejor adaptación fueron la adquisición del lenguaje antes de los cinco años y una capacidad intelectual bastante notable. Durante la adolescencia, los autistas más brillantes habían tomado amarga

conciencia de sus peculiaridades y habían realizado esfuerzos voluntarios para adaptarse; pero ni siquiera los mejor adaptados solían cobrar confianza en sí mismos o trabar amistades. Había, empero, algo que resultaba siempre benéfico: la creación de un entorno muy estructurado.

En cuanto se conoció el trabajo de los primeros investigadores, clínicos de todas partes comenzaron a descubrir niños autistas. Se vio así que, además de su inadaptación social, presentaban notables limitaciones intelectuales. Aunque algunos superan bien ciertas pruebas, por ejemplo reconstruir un enlosado con cubos, hasta los más capaces fallan en preguntas que contesta el sentido común.

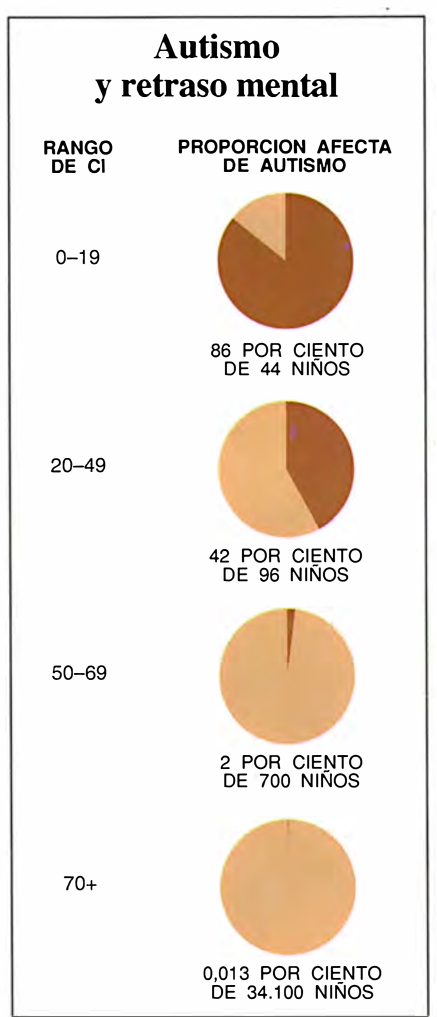
El autismo es una minusvalía poco frecuente. Si aplicamos los criterios restrictivos de Kanner, aparece en cuatro de cada 10.000 nacimientos; pero si lo medimos con los criterios, más amplios, de la práctica diagnóstica actual, la incidencia sube: uno o dos por cada 1000 nacimientos, una proporción parecida a la que se da en el síndrome de Down. La frecuencia en los varones es de dos a cuatro veces la registrada en las mujeres.

Durante muchos años se creyó que el autismo era un trastorno psicológico, carente de base orgánica. No se encontraron, en un comienzo, trastornos claramente neurológicos. Los niños autistas no tenían necesariamente una baja capacidad intelectual, y su apariencia física era normal. Se recurrió a teorías psicogénicas, en boga a lo largo de bastante tiempo; partían de la idea de un autismo inducido: el niño se convertía en autista tras alguna experiencia vital amenazadora; la ausencia del calor materno o una experiencia traumática de rechazo provocaban que el pequeño se recluyera en un mundo interno de fantasía, absolutamente refractario al mundo exterior.

Pero ese tramado teórico no ha recibido ningún respaldo de la realidad empírica. Ni parece probable que lo reciba. Abundan los ejemplos de rechazo y deprivación extremos en la infancia sin que ninguno de ellos resulte en autismo. Lo que no obsta para que las terapias más o menos fundadas en esas ideas sigan culpabilizando a los padres de una fractura, supuestamente evitable y reversible, de las interacciones interpersonales. Frente a ello, los programas de modificación de conducta bien estructurados han ayudado a las familias en su trato con los niños autistas, en particular de los especialmente difíciles. Programas que no pretenden en absoluto restablecer un desarrollo normal.

La falta de respaldo de la explicación psicogénica del autismo indujo a varios a bucear en las causas biológicas, en alguna estructura cerebral dañada. Pero ésta todavía no se ha encontrado. Se supone que la minusvalía cerebral afecta al razonamiento de los autistas, incapacitándolos para evaluar sus propios pensamientos o para percibir con claridad qué es lo que ocurre en la mente de otra persona.

El autismo aparece en estrecha asociación con otros trastornos clínicos y médicos; entre éstos, rubéola materna, anomalías cromosómicas, lesión cerebral precoz y crisis convulsivas infantiles. De mayor calado son las investigaciones que apuntan hacia una base genética del autismo. La probabilidad de que dos gemelos idénticos padezcan autismo es mucho mayor que en el caso de dos gemelos dicigóticos. Además, la probabilidad de que el autismo se repita en una misma familia es de 50 a 100 veces mayor de lo esperable por puro azar.



FUENTE: *Lorna Wing, Medical Research Council, Londres*

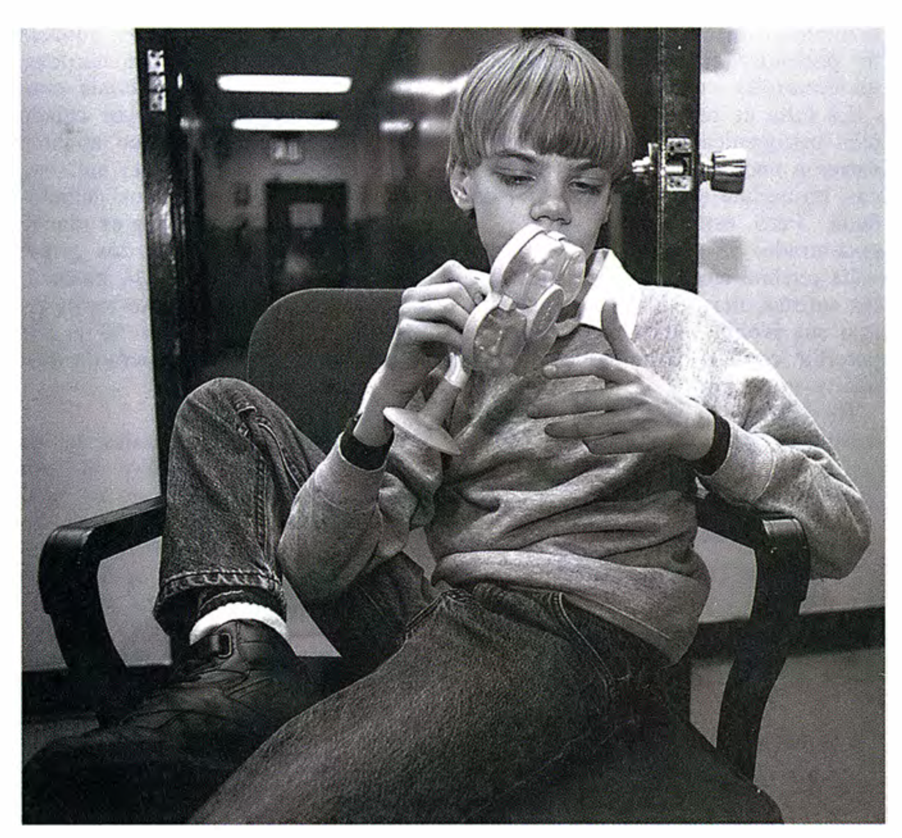
2. ESTRECHA RELACION entre autismo y retraso mental, reflejada en este diagrama. El porcentaje de niños que muestran un deterioro social típico del autismo es máximo en niveles bajos de inteligencia, cuando la miden tests en los que un coeficiente de inteligencia (CI) inferior a 70 es considerado subnormal. Por ejemplo, el 86 % de 44 niños con el mínimo rango de CI mostraron el deterioro social típico del autismo. Los datos han sido extraídos de una población de alrededor de 35.000 niños de menos de 15 años.

Las anomalías estructurales de los cerebros de individuos autistas se han puesto de manifiesto en estudios anatómicos y a través de las técnicas de representación gráfica del órgano. Los trabajos de epidemiología y neuropsicología, por su parte, han demostrado la estrecha correlación del autismo con el retraso mental, en clara relación, a su vez, con disfunciones fisiológicas. Datos todos ellos que encajan bien con la hipótesis de un autismo causado por una alteración cerebral definida, que forma parte a menudo de un daño más extenso. Si la alteración es intrusiva, el retraso mental será más grave y aumentará la probabilidad de que se interese el sistema cerebral crítico. Pero cabe lo opuesto, es decir, que sólo aparezca dañado el sistema crítico, en cuyo caso el autismo no se acompaña de retraso mental.

Los tests neuropsicológicos han aportado también pruebas de que existe una alteración cerebral bastante bien delimitada. Autistas, en todo lo demás normales, muestran incapacidades específicas y extensas en tests que involucran planificación, iniciativa y producción espontánea de nuevas ideas. Las mismas limitaciones aparecen en pacientes con el lóbulo frontal lesionado; de lo que parece plausible inferir que, cualquiera que sea la estructura cerebral afectada, los lóbulos frontales se hallan implicados.

Los estudios demográficos realizados por el equipo de Lorna Wing, de la unidad de psiquiatría social del Consejo de Investigaciones Médicas londinense, revelan que los síntomas del autismo no se agrupan aleatoriamente. Se da, por contra, una tríada específica de rasgos constitutivos que muestran deterioro: la comunicación, la imaginación y la socialización.

En la merma de la capacidad comunicativa convergen fenómenos tan dispares como el mutismo y el retraso en la adquisición del lenguaje, así





3. LAS CONDUCTAS INSOLITAS son frecuentes en los autistas. Los niños suelen dedicarse a hacer girar los juguetes u otros objetos (*arriba*) y a jugar de manera repetitiva. Otro rasgo es el de ignorar los esfuerzos de los demás por comunicarse o por comprometer al autista en una actividad (*abajo*).

como problemas en la comprensión y uso del lenguaje corporal (no verbal); en otros autistas, aunque hablan con fluidez, su comprensión del lenguaje es absolutamente literal. La alteración de la imaginación se evidencia en los niños autistas con sus manipulaciones repetitivas de los juguetes y en algunos adultos a través de un interés obsesivo por los detalles. Manifiestan su minusvalía en la socialización con su ineptitud y maneras inapropiadas en un amplio abanico de interacciones sociales recíprocas, por ejemplo, a la hora de crear y mantener amistades; ello no obsta para que muchas personas autistas prefieran la compañía y deseen agradar.

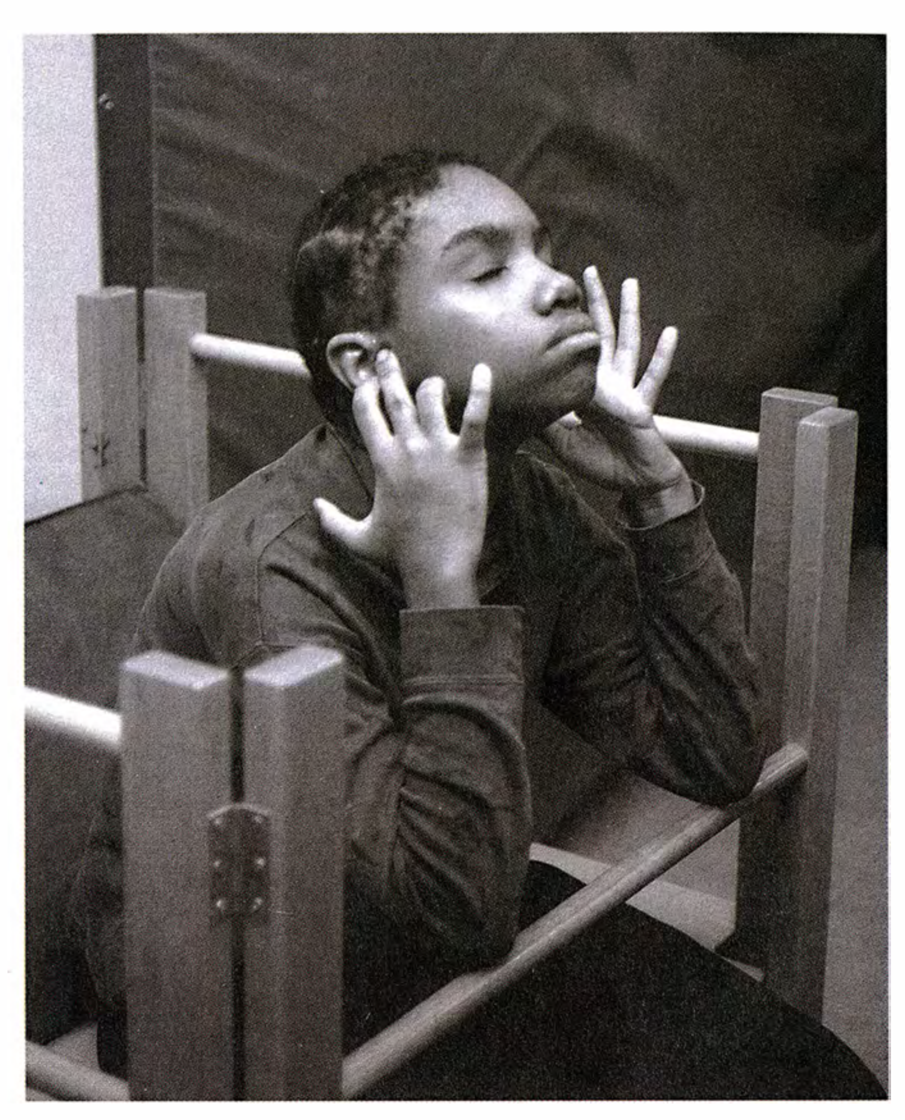
Pero, ¿por qué se dan conjuntamente estas alteraciones, y sólo éstas? La psicología tenía ahí un reto claro: identificar el componente cognitivo que explicara tales limitaciones y dejara intacta la capacidad normal evidenciada en otro aspectos de las interacciones interpersonales. Con mis compañeros de la unidad de desarrollo cognitivo del Consejo de Investigaciones Médicas de Londres, creo haber hallado ese componente último. Se trata de un mecanismo cognitivo de naturaleza muy compleja y abstracta que podría describirse en términos cibernéticos. En esencia, podemos referirnos a él a través de una de sus funciones principales, a saber, la capacidad de pensar sobre los pensamientos o de imaginar el estado mental de otro individuo. Afirmamos que dicho componente se halla alterado en el autismo. Más aún, sugerimos que este componente mental, innato, posee su propio sustrato cerebral. Si se consiguiera identificar este sustrato —sea una estructura anatómica, un sistema fisiológico o una vía química— podría haberse encontrado el origen biológico del autismo.

La importancia de este componente en el desarrollo normal se hace evidente muy temprano. A partir del final del primer año, los niños empiezan a participar en lo que se ha llamado la atención compartida; así, los niños normales señalan algo con el objeto exclusivo de compartir su interés con otra persona. Los niños autistas no muestran atención compartida, hasta el punto de que la ausencia de esta conducta suele ser uno de los signos precoces de su minusvalía. Cuando un niño autista señala un objeto, es sólo porque lo quiere.

En el segundo año de vida, se aprecia una manifestación significati-

va del componente crítico en los normales: la aparición de la simulación, la capacidad para ocuparse en fantasías y simular en el juego. Los niños autistas no saben entender la simulación, ni simulan cuando juegan. Fijémonos en el juego architípico de cualquier jardín de infancia: el "dar de comer" a un muñeco con una cuchara vacía; el niño normal lleva a cabo los movimientos adecuados de dar de comer y acompaña la acción con los sonidos apropiados de sorber; el autista se limita a girar o lamer la cuchara repetitivamente. Esa ausencia de conductas comunicativas tempranas y elementales, como la atención compartida y el juego fingido, suele ser el primer aldabonazo de duda que golpea a los padres preocupados por el desarrollo de su hijo. Sienten con razón que no consiguen comprometer al niño en el vaivén emocional de la vida diaria.

Mi colega Alan M. Leslie ha diseñado un modelo teórico de los mecanismos cognitivos que subyacen a las capacidades claves de la atención compartida y la simulación. Postula un mecanismo innato cuya función es la de formar y utilizar lo que podrían llamarse representaciones de segundo orden. El mundo circundante no consiste sólo en objetos visibles y acontecimientos, captados por representaciones de primer orden, sino también en mentes invisibles y sucesos mentales, que requieren representaciones de segundo orden. Ambos tipos de representaciones deben ser tenidas en cuenta y distinguirse unas de otras.



4. EL ENSIMISMAMIENTO manifestado por esta niña autista es una característica frecuente del trastorno. En la película *Rain Man*, el ensimismamiento era el rasgo central del protagonista, un autista adulto interpretado por el actor Dustin Hoffman.

Las representaciones de segundo orden sirven para conferir significado a informaciones que en sí son contradictorias o incongruentes. Supóngase que una niña normal, Berta, ve a su madre sostener un plátano haciendo ver que es un teléfono. Berta tiene en su mente hechos sobre plátanos y hechos sobre teléfonos, es decir, representaciones de primer orden. Pero Berta no se confundirá en lo más mínimo y no empezará a comer teléfonos y hablar a los plátanos. La niña evita la confusión porque computa, a partir del concepto de simulación (una representación de segundo orden), que su madre está simultáneamente ocupada en una actividad imaginaria y en otra real.

A tenor de la explicación que ofrece Leslie del proceso mental, el acto de simular debe entenderse como la computación de una relación entre tres términos: la situación real, la situación imaginaria y el agente que realiza la simulación. La situación imaginaria no recibe el mismo tratamiento que la situación real. La creencia puede asimilarse a la simulación. Apoyados en ese planteamiento de las cosas, pudimos predecir que los niños autistas, pese a estar en la edad mental adecuada (por encima de los cuatro años), no comprenderían que alguien pudiera tener una creencia errónea del mundo.

Para someter a prueba esa hipótesis predictiva, adapté, con mi colaborador Simon Baron-Cohen, cierto experimento que habían ideado dos psicólogos del desarrollo austríacos, Heinz Wimmer y Josef Perner. El test se ha dado en llamar la "tarea Sally-Anne". Sally y Anne juegan juntas. Sally tiene una canica que introduce en una cesta antes de salir de la habitación. Mientras está fuera, Anne cambia la canica de lugar y la guarda en una caja. Cuando Sally vuelve y quiere recuperar la canica, mira lógicamente en la cesta. Si escenificamos el ejemplo en un teatrillo de marionetas ante un público de niños normales de cuatro años o más, éstos entenderán que Sally mire en la cesta aunque sepan que la canica no está allí. En otras palabras, saben representarse la creencia errónea de Sally, así como la situación real de las cosas. Hicimos el mismo experimento con autistas. Dieciséis de veinte niños con una edad mental media de nueve años fallaron en la tarea —contestaron que Sally miraría en la caja— a pesar de ser capaces de responder correctamente a otras preguntas relacionadas con los hechos del episodio. No pudieron idear la posibilidad de que Sally pensara algo que no fuera cierto.

Se han desarrollado numerosos experimentos similares en otros labora-



5. EL CONTACTO SOCIAL puede a veces lograrse en los autistas, particularmente en situaciones familiares y bien estructuradas. El adolescente autista de la fotografía, en un ambiente familiar, disfruta y responde a la música mientras su padre toca la guitarra.

torios, que han confirmado ampliamente nuestra predicción: los niños autistas presentan una alteración específica en la comprensión de los estados mentales: carecen del componente innato subyacente a esta capacidad. Este componente, cuando opera con normalidad, tiene consecuencias de larguísimo alcance para los procesos conscientes de orden superior, pues resalta la característica especial de la mente humana: la capacidad de reflejarse a sí misma. Por tanto, la tríada de alteraciones del autismo —en la comunicación, la imaginación y la socialización— se explica por el fracaso de un único mecanismo cognitivo. En la vida diaria, hasta los autistas más hábiles hallan dificultades para tener al mismo tiempo en mente una realidad y el hecho de que otra persona posea una visión equivocada de esa realidad.

La capacidad automática de las personas normales para juzgar estados mentales nos convierte en lectores de la mente. Con la suficiente experiencia, podemos forjar y utilizar una teoría de la mente que nos permite especular sobre las motivaciones psicológicas de nuestra conducta y manipular las opiniones, creencias y actitudes de los demás. El autista, sin esa capacidad automática de representarse creencias, carece por tanto de una teoría de la mente. No puede comprender cómo la conducta está causada por estados mentales, ni entiende que se manipulen creencias y actitudes. De ahí su desconcierto ante el engaño. Los entresijos psicológicos de la vida real o los creados por la ficción literaria —vale decir, todo aquello que da color a las relaciones sociales—, son para ellos un libro cerrado. "Las personas se hablan con los ojos", decía un joven autista observador. "¿Qué es lo que se dicen?"

Faltos de un mecanismo de teoría de la mente, los niños autistas se desarrollan de un modo enteramente distinto del que siguen los niños normales. Los segundos adquieren habilidades sociales y comunicativas cada vez más complejas conforme van ejerciendo otras capacidades cognitivas; aprenden, por ejemplo, que existen expresiones de sentimientos falsas y sinceras, y se hacen expertos en ese aspecto esencial de la comunicación humana que es el leer entre líneas. Aprenden a entender y practicar el humor y la ironía. En resumen, nuestra capacidad para involucrarnos en ideas imaginativas, interpretar sentimientos y comprender las intenciones escondidas detrás del significado literal del habla son todos ellos logros que dependen, en última instancia, de un mecanismo cognitivo innato. Los niños autistas encuentran difícil, si no imposible, conseguir ninguna de estas cosas. Nosotros lo atribuimos a que presentan menoscabado ese mecanismo.

Tal explicación cognitiva del autismo es específica. Permite, pues, separar los tipos de situaciones en las que el autista tendrá problemas de las que no le presentarán ninguno. No excluye la existencia de habilidades y capacidades especiales que sean independientes del mecanismo innato que mis colegas y yo consideramos alterado. En este orden, los autistas pueden desarrollar habilidades sociales que no impliquen un intercambio entre dos mentes. Son capaces de aprender muchas rutinas sociales útiles, hasta el extremo de camuflar sus propios problemas. La minusvalía cognitiva que postulamos es también lo suficientemente específica como para no impedir importantes logros en actividades muy dispares, desde la ejecución musical, hasta el dibujo artístico, pasando por las matemáticas y la memorización de hechos.

Queda por tejer una explicación sólida de la coexistencia, en los autistas, de rendimientos excelentes y rendimientos deficientes que suelen ir de la mano. Desconocemos, asimismo, si hay una alteración añadida de las emociones, que impediría a algunos niños autistas interesarse por los estímulos sociales. No se sabe a qué atribuir el afán por ciertas actividades perseverantes y a menudo obsesivas. En el autista parece como si faltara una poderosa fuerza integradora, la voluntad de hallar un sentido a lo que se hace.

La estampa estereotipada del niño encerrado en su campana de cristal induce a más de un error. No es cierto que esa pantalla aloje a una persona normal y dispuesta a salir. Tampoco lo es que el autismo sea trastorno exclusivo de la infancia. La película *Rain Man* llegó en el momento apropiado para sugerir una nueva imagen a un público receptivo. En ella se muestra a Raymond, un hombre de mediana edad que vive fuera del mundo, egocéntrico hasta el extremo y muy manipulable por los demás. Incapaz de comprender los dobles juegos de su hermano, que son sin embargo transparentemente obvios para el espectador de la película. A través de varias peripecias, su hermano comienza a entender a Raymond y forjar un vínculo emocional con él. No se trata de un historia rebuscada. Podemos conocernos muchísimo mejor a través del fenómeno del autismo.

Pero no hay que envolver la en-

fermedad en una celofán romántico. El autismo constituye una minusvalía devastadora e incurable. La mente del niño autista no logrará, quizá nunca, desarrollar la conciencia de sí mismo. Pero podemos ya empezar a caracterizar los tipos particulares de conducta social y de respuesta emocional de los que los autistas son capaces. Estos aprenden a expresar sus necesidades y prever la conducta de los demás si está regulada por factores externos y observables y no por estados mentales. Pueden formar lazos emocionales con los demás. A menudo se esfuerzan por agradar y desean con ahínco ser instruidos en las reglas de las relaciones duales, de persona a persona. No hay duda de que, dentro de limitaciones muy severas, se alcanza cierto grado de sociabilidad satisfactoria.

El aislamiento del autista no tiene que significar soledad. La terrible frialdad que muchos padres observan en su hijo autista no es permanente. Con el tiempo, suele ceder paso a la preferencia por la compañía. Y así como reordenamos nuestro entorno para facilitar el desenvolvimiento de los invidentes o de quienes demandan atenciones especiales, podemos adaptar el ambiente a las condiciones del autista.

Ello no niega que debamos ser realistas sobre el grado de adaptación que puede conseguir la persona con tales limitaciones. Puede esperarse cierta compensación y una modesta capacidad para afrontar las adversidades, pero no confiar que progrese con su mente privada de capacidad de autorreflexión, una condición que no escogió al nacer. Por su parte, los autistas pueden pedirnos a nosotros más comprensión para con su situación, en la medida en que entendamos mejor cuán distinta es su mente de la nuestra.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

AUTISM: EXPLAINING THE ENIGMA. Uta Frith. Blackwell Publishers, 1989.

THE COGNITIVE BASIS OF A BIOLOGICAL DISORDER: AUTISM. Uta Frith, John Morton y Alan M. Leslie, en *Trends in Neurosciences*, vol. 14, n.º 10, págs. 433-438; octubre de 1991.

AUTISM AND ASPERGER SYNDROME. Dirigido por Uta Frith. Cambridge University Press, 1992.

UNDERSTANDING OTHER MINDS: PERSPECTIVES FROM AUTISM. Dirigido por Simon Baron-Cohen, Helen Tager-Flusberg y Donald J. Cohen. Oxford University Press, 1993.

El gran pozo de China

Hace más de siglo y medio los chinos perforaron a una profundidad de un kilómetro para extraer salmuera de la que sacar la sal. El pozo fue la culminación de una técnica nacida ochocientos años antes

Hans Ulrich Vogel

La provincia de Sichuan, en el interior de China, esconde una de las maravillas tecnológicas del mundo: el pozo de Xinhai. No sólo destaca por su antigüedad de 158 años y su profundidad de 1001 metros; es el logro señero de una industria que inventó la perforación a gran profundidad cuatro siglos antes de que los europeos empezasen a practicarla.

Los sichuaneses ahondaban ya a 100 metros de profundidad, hasta los yacimientos de salmuera, hará casi mil años. Crearon elaborados sistemas de extracción y refinamiento para obtener la preciada sal. Toparon incluso con yacimientos de gas natural, y fueron los primeros que hicieron de éste uso comercial —con él alimentaban el fuego que evaporaba la salmuera—. Hoy se considera que la perforación profunda es una de las grandes innovaciones de la antigua China, en pie de igualdad con las invenciones del papel, la imprenta, la pólvora y la brújula. La industria china de la sal del siglo IX es, en cierta forma, la precursora de la actual técnica de extracción del petróleo.

En 1983 me decidí a investigar la



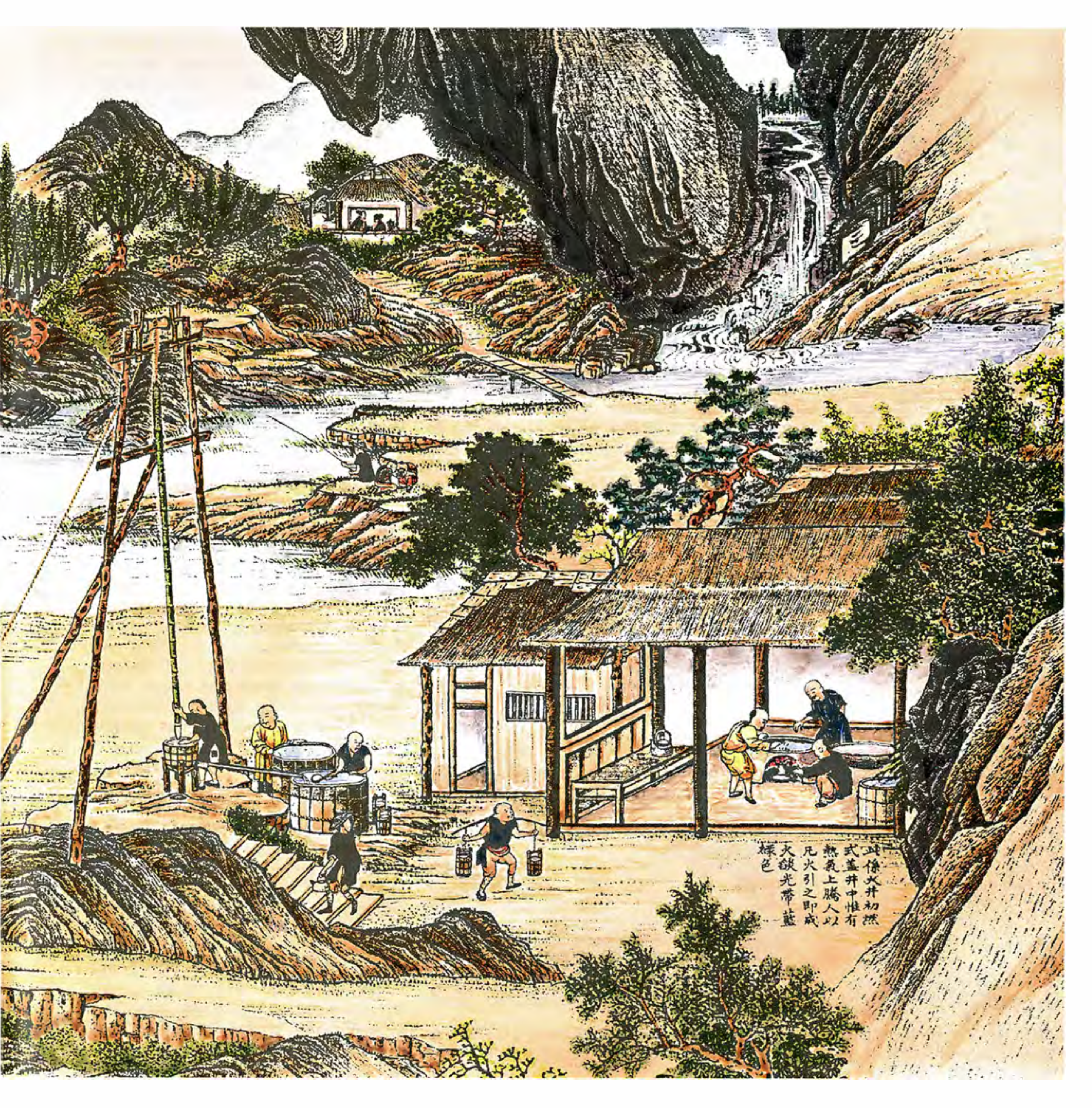
1. PERFORACIONES que se hundían a una profundidad de cien metros o más proporcionaban salmuera y gas natural en la provincia china de Sichuan. La salmuera, que se cocía hasta que quedaba sólo la sal, fue vital para la economía regional durante más de 2000 años. La ilustración es una reproducción ampliada de un rollo chino pintado alrededor de 1750. Se extraía la salmuera del pozo mediante un tubo de bambú suspendido de una soga; la ponían después a un fuego alimentado por gas natural.

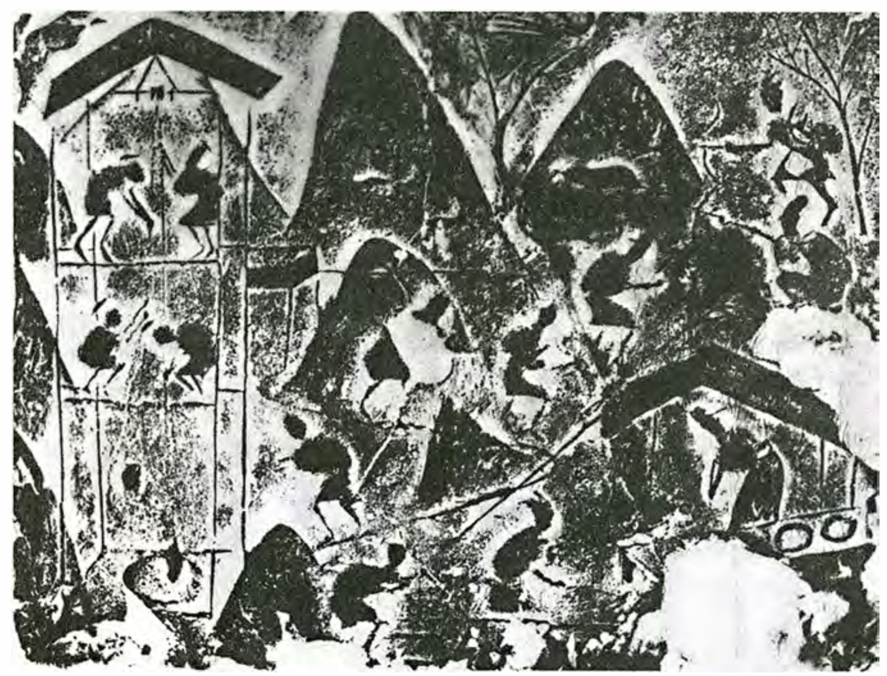
HANS ULRICH VOGEL es profesor de sinología en la Universidad de Heidelberg. Tras doctorarse en Historia China en 1983 por la Universidad de Zurich, investigó la historia de la industria de la sal en la provincia de Sichuan.

producción de sal en China. Encontré poca información fiable sobre las perforaciones a gran profundidad. La mayoría de las fuentes eran descripciones de los pozos hechos en nuestro siglo, y algunas se basaban a su vez en fuentes sichuanesas tradicionales. En los últimos años, los investigadores chinos han descubierto un gran número de escritos y artefactos que han arrojado mucha luz sobre la producción y comercio de la sal en China. Las publicaciones dedicadas al tema han proliferado, en consecuencia, por todo el país. Estamos ahora en condiciones de poner en entredicho algunas de las leyendas más arraigadas y de ofrecer una historia fiel de los espectaculares pozos de sal de Sichuan.

La industria de la sal fue uno de los ejes a cuyo alrededor giró la historia económica y social de China. Los gobernantes intentaron monopolizar la producción y el comercio de la sal en todo el imperio hará más de 2100 años. En el siglo XIV, bajo la dinastía Yang, hasta un 80 % de la recaudación procedía de los impuestos que gravaban la industria de la sal; con la dinastía Ming, que gobernó China desde 1368 hasta 1648, el porcentaje era de un 40 %; el imperio Qing, que perduró hasta 1911, debía aún a la sal la décima parte de sus ingresos.

No era la salmuera de los pozos la mayor fuente de sal en China: del mar procedía —así fue a lo largo de la mayor parte de los últimos mil años— el 80 % de la producción total. A pesar de ello, los pozos eran fundamentales para la riqueza y prosperidad de los sichuaneses, ya que, en esta zona interior de la China, la



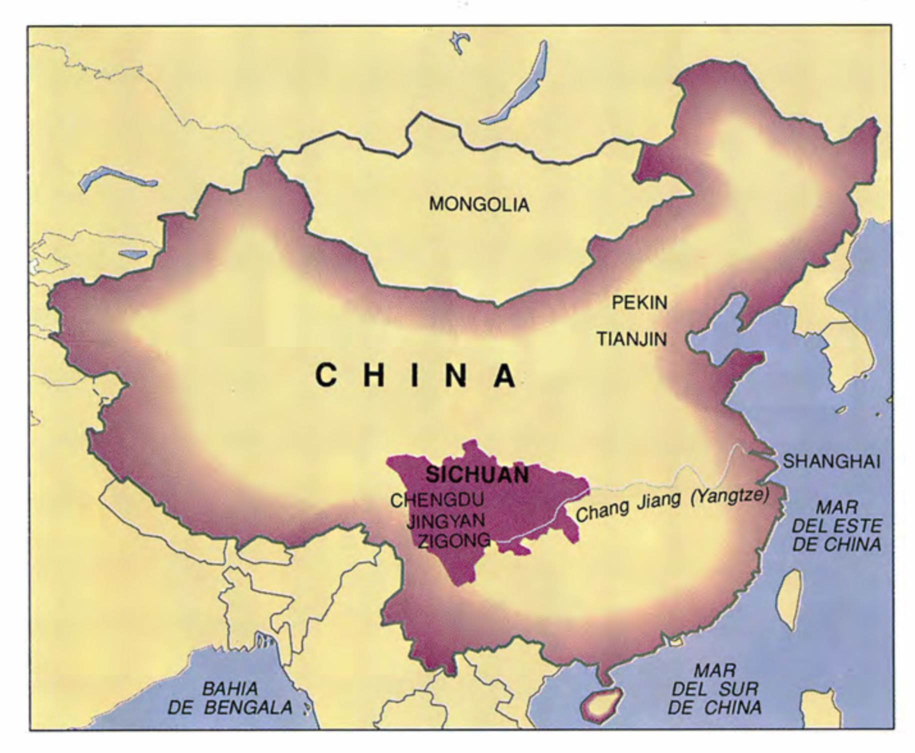


2. PRODUCCION DE SAL en el siglo segundo en China. En este calco del relieve de la lápida de una tumba se ve a los trabajadores que extraen la salmuera de un pozo (*a la izquierda*) por medio de un cable, bolsas hechas con pieles de animales, una polea y un andamio. La salmuera se hervía en un hogar (*derecha*) para obtener la sal.

excavación de pozos resultaba más barata que la importación de sal marina.

Antes de que se inventara la perforación a gran profundidad, los chinos llegaban a los yacimientos de salmuera excavando pozos poco profundos. Un relieve perteneciente a una tumba del siglo II es la prueba concluyente de que los chinos ya habían desarrollado por entonces técnicas para la extracción de la salmuera subterránea mediante pozos de mina. En el relieve se ve a los trabajadores sacando salmuera de una perforación.

Por desgracia, no se sabe mucho de la manera en que se utilizaban este tipo de pozos en la antigüedad. Sólo encontramos buenas descripciones en escritos de siglos posteriores. En 1177, por ejemplo, el supervisor de Sichuan, Hu Yuanzhi, nos dejó un relato particularmente vivo del proceso; en él nos explica cómo, para empezar la busca de la salmuera, los operarios inspeccionaban el terreno de los valles de montaña, y cómo, tras esa indagación preliminar, excavaban agujeros de sondeo hasta una profundidad de unos 60 u 80 zhang (un zhang equivale a unos 3,6 metros). Si tenían suerte y encontraban una veta de sal, reforzaban los laterales de la oquedad recubriéndolos con piedra. Una vez se había construido el pozo, los obreros bajaban con una soga, hasta el fondo, bolsas hechas de piel de búfalo, que una vez allí se llenaban de salmuera. Cuarenta hombres trabajando sin descanso podían drenar el pozo en unas doce horas. La última fase del proceso consistía en la cocción de la salmuera: se la vertía en unos recipientes planos puestos a un fuego alimentado por madera y grasa, hasta que al final no quedase más que la sal.



3. JINGYAN, en la provincia de Sichuan, es el lugar donde se inventó, hará más de 900 años, la perforación a gran profundidad. En el siglo XVIII el centro de la industria se trasladó a Zigong.

Estos pozos de mina solían ser muy rentables, pero perdieron su importancia económica tras el desarrollo de la perforación a gran profundidad y la aparición de la técnica de taladro. Las fuentes históricas dan a entender que la invención de este sistema tuvo lugar en el siglo XI en la comarca de Jingyan, a unos 130 kilómetros al sur de la capital de Sichuan, Chengdu. Una de las primeras menciones de la perforación profunda se debe a un tal Wen Tong, prefecto de la región, quien escribía hacia 1071: "(Hace veinte años) la población local empezó a construir pozos mediante perforaciones del suelo entibadas con tubos de bambú. Estos pozos perforados sirven para extraer (salmuera) que luego cuecen y refinan, transformándola en sal. (Las gentes de Jingyan) han llegado a ser maestras en la práctica de este método, y se ha elevado enormemente el número de quienes lo llevan a cabo."

Los pozos pertenecían a varias familias ricas y poderosas de Jingyan; los operarios eran inmigrantes. Al producir sal a bajo coste, las explotaciones de Jingyan podían competir con los pozos de mina regidos por el estado, que daban una sal adulterada y cara. Parece que a Wen Tong le preocupaba que esta nueva industria, no sujeta a regulación, arruinara el monopolio estatal. Urgía también a que se impusiesen la ley y el orden sobre la creciente población de

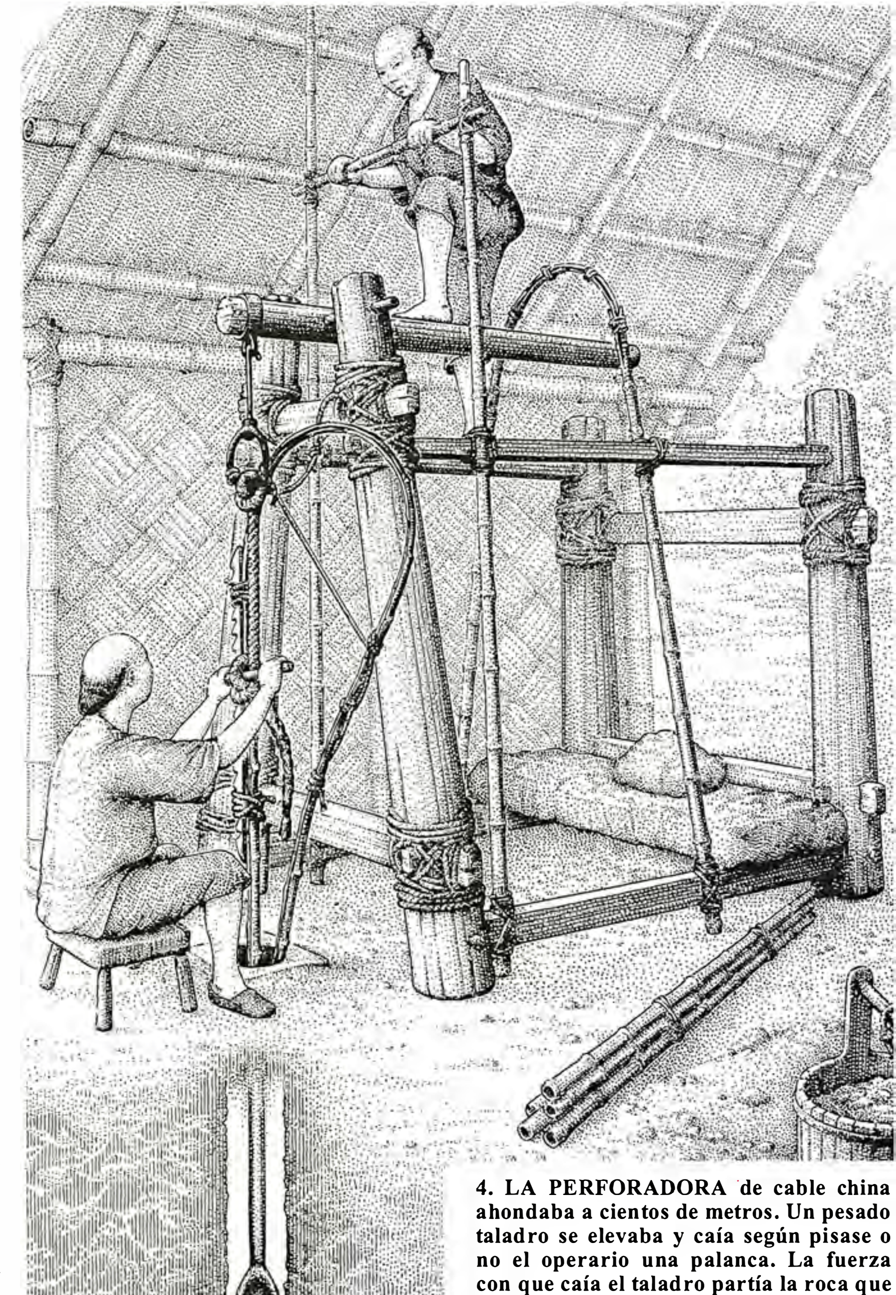
inmigrantes. Tal vez fuesen éstas las razones que le llevaron a escribir que Jingyan era "un importante y complicado puesto oficial que precisa de un gobierno adecuado". Mientras vivió Wen Tong, el estado sintió la necesidad de intervenir en las actividades empresariales de los sichuaneses, en particular en las industrias del té y la sal. Durante una década más o menos, el estado prohibió la construcción de pozos en casi todo el territorio de Sichuan. Pero cuando los defensores de la política de intervencionismo perdieron poder en 1089, la administración imperial relajó la prohibición.

No pasarían muchos años antes de que los sichuaneses hubiesen perforado por toda la región en pos de la salmuera. En 1132 las autoridades registraron más de 4900 pozos en Sichuan, la mayoría pozos de taladro: el crecimiento de la industria de la sal era extraordinario. Del siglo X al XII, el número de pozos se multiplicó por ocho.

Los historiadores conocen este antiguo arte de la construcción de pozos perforados gracias a los escritos de unos cuantos ilustrados y funcionarios, entre los que destacan Su Shi y Hu Yuanzhi. El primero dio alguna información de carácter técnico sobre los métodos que se utilizaban a mediados del siglo XI. Tras perforarlo, los obreros vaciaban gruesas cañas de bambú que, conectadas entre sí, introducían en el agujero. Estos tubos servían de pared al pozo y evitaban que la salmuera, que se encontraba al fondo, se contaminara con las aguas subterráneas. Según Su Shi, los pozos tenían la anchura de un tazón y podían alcanzar profundidades de 120 metros o más. Para extraer la salmuera, se utilizaba una caña de bambú hueca con una válvula en uno de los extremos. Su Shi no deja claro cómo funcionaba esta válvula, ni cómo se introducía la salmuera en el bambú. Sí afirma que la cantidad de salmuera que se extraía por cada tubo era de varios dou (un dou equivale a unos 6,6 litros).

En 1177, Hu Yuanzhi relataba algunas dificultades con que tropezaba este tipo de operaciones. Los tubos de bambú que cubrían las paredes del pozo se caían a veces; otras, piedras y tierra los obstruían. Los trabajadores tenían distintos instrumentos para desatascar los pozos, pero a veces perdían semanas o meses tratando de repararlos sin conseguirlo.

Los documentos históricos de los siglos XI y XII no entran en detalles relativos a las técnicas de perforación a gran profundidad, y así es muy difícil deducir cómo se construían los pozos y se extraía la salmuera. A fin de conocer mejor las técnicas que se desarrollaron al norte de Sichuan durante el siglo XI, examiné documentos de épocas posteriores, busqué indicios arqueológicos e hice trabajo de campo.



4. LA PERFORADORA de cable china ahondaba a cientos de metros. Un pesado taladro se elevaba y caía según pisase o no el operario una palanca. La fuerza con que caía el taladro partía la roca que hubiese debajo. Un segundo trabajador se encargaba de girar el cable tras cada golpe, a fin de que la perforación fuese perpendicular y redonda.

En cuanto a la elección del lugar adecuado donde perforar, los sichuaneses podían hacer poco más que inspeccionar el terreno. Solían optar por sitios próximos a pozos rentables. El aparato con el que se llevaba a cabo la perforación consistía en un taladro de hierro que pesaba unos cien kilogramos. El taladro se suspendía de un cable de bambú atado al extremo del lado más corto de una palanca de unos pocos metros de longitud. El operario izaba el perforador colocándose sobre el lado más largo de la palanca, y luego, saltando, dejaba caer el taladro, que golpeaba de esta forma el suelo. Tras perforar un orificio ancho de unos 50 metros de profundidad, los trabajadores solían utilizar un taladro de menor diámetro para ahondar más.

Para eliminar del agujero el agua y los residuos, los sichuaneses ma-

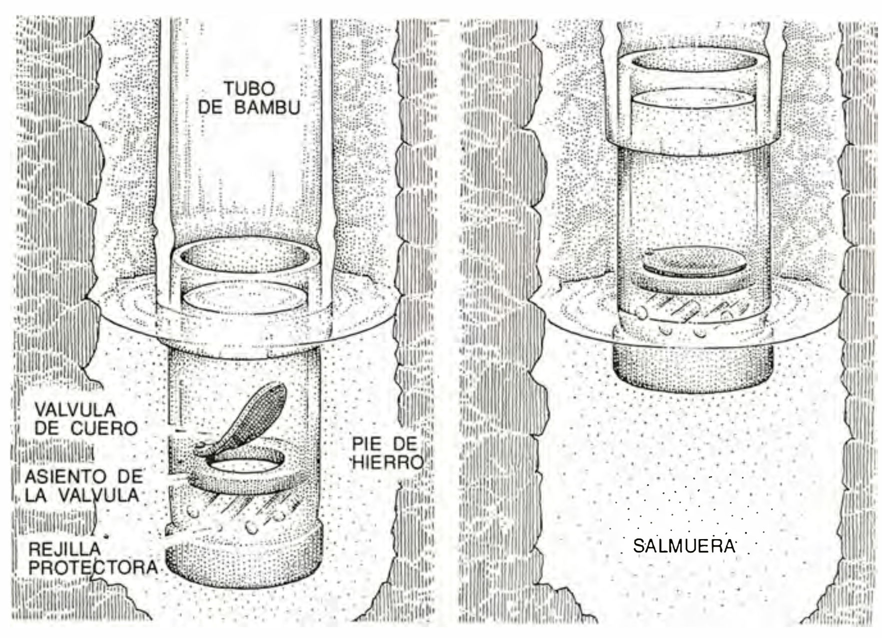
nejaban el bambú de una forma innovadora. La caña de bambú tiene distintas secciones, huecas en el centro y macizas en los extremos. La talla de una abertura al principio de cada sección producía una serie de pequeños recipientes. Los trabajadores introducían las cañas así preparadas hasta el fondo del agujero, y dejaban que la tierra y el agua fluyeran a los recipientes. Después las sacaban y extraían lo que contenían. Si la tierra estaba seca, echaban agua en el agujero hasta que se formase fango. Las conducciones de bambú se colocaban en la sección más ancha del pozo, nunca en el estrechamiento del fondo. Se conectaban unas a otras estas cañerías, de unos 10 o 13 centímetros de diámetro, y se las impermeabilizaba.

Para extraer la salmuera, se necesitaba una caña de bambú que tuviera en el extremo inferior una válvula de cuero que sólo permitiera la circulación en un sentido. Se ataba la parte superior del tubo a un cable de bambú que se enrollaba alrededor de un gran tambor. El tubo se introducía hasta el fondo del pozo, y la válvula de cuero se abría a medida que se sumergía en la salmuera, cerrándose si el tubo se izaba. El operario forzaba al líquido a subir por la cañería hueca, hasta llenarla, moviéndola arriba y abajo rápidamente en la salmuera. Una vez el tubo estaba lleno, lo alzaban enrollando el cable alrededor del tambor. (En épocas posteriores se utilizó un tubo similar en el proceso de perforación, para retirar el fango.) Tras izarlo y retirarlo del pozo, manteníase el tubo en posición vertical mediante distintas estructuras que había para tal fin. La más sencilla consistía en una arandela enganchada al extremo de un poste; la parte superior del tubo se introducía en ella, y quedaba encajada; entonces, un operario situaba un contenedor bajo el extremo inferior y abría la válvula con un gancho, dejando verter la salmuera.

La configuración de los pozos de Sichuan no sufrió cambios esenciales durante cerca de 500 años, por la presumible razón de que el estricto control del gobierno sobre la industria de la sal cortaba las alas a la innovación. No obstante, a finales del siglo XVI, los sichuaneses introdujeron algunas modificaciones que les permitieron perforar hasta los 300 metros de profundidad.

El cuadro más preciso de este período nos lo da la *Relación ilustrada de la producción de los pozos de sal (Yanjing tushuo),* que Ma Ji escribió entre 1580 y 1590. El texto trata sobre los pozos de sal de Shehong, una comarca al norte de Sichuan. Por desgracia, las ilustraciones se han perdido. Por esta y otras fuentes sabemos cuáles fueron los cuatro principales avances de la técnica de construcción y explotación de los pozos desde el siglo XVI en adelante. El primero fue la construcción, en la parte superior del suelo, antes del proceso de perforación, de un agujero de paredes recubiertas con piedra: evitaba que la tierra suelta obstruyese el pozo durante el proceso de taladro. El segundo, que los operarios utilizasen a veces búfalos para tirar del mecanismo del torno. El tercero, el descubrimiento de distintas formas de emplear el gas natural que salía de los pozos de salmuera; se construyeron notables sistemas para su almacenamiento y se fabricaron hornos de gas con los que evaporaban la salmuera. Sin embargo, el uso del gas natural no se generalizaría hasta mucho más tarde.

La cuarta y más interesante novedad fue el desarrollo de un dispositivo empleado en el siglo XVI para rescatar los taladros atascados en los pozos. Recibía el nombre de "sacudida". El extremo superior de la "sacudida" se conectaba a una pesada barra que a su vez se unía al cable del taladro; a la parte inferior se le acoplaba un enganche. La "sacudida" permitía cierto juego entre la barra y el enganche, de suerte que pudiesen moverse hacia arriba o hacia abajo de forma independiente. Para retirar un trozo de taladro atascado, se bajaba el enganche hasta posarlo en lo alto de la pieza. A continuación, el cable del taladro se izaba lo justo para que la barra se elevase, pero no el enganche. Entonces se soltaba el cable del taladro de tal forma que la pesada barra golpease el extremo superior del enganche, "sacudiéndolo" o martilleándolo hasta que quedase firmemente conectado al taladro. Finalmente, enrollando el cable, los operarios podían, con un poco de suerte, sacar el taladro y todo lo demás.

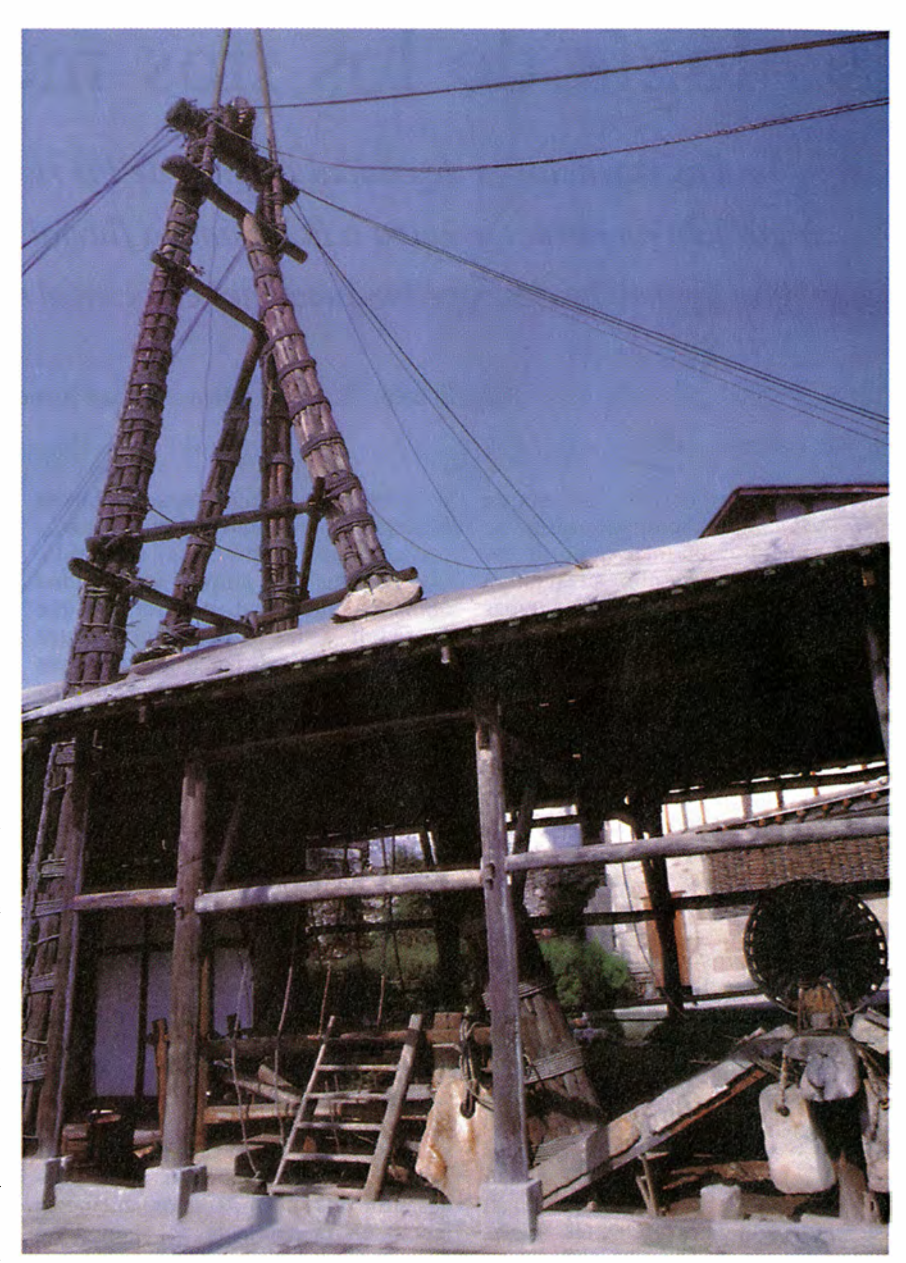


5. TUBOS DE CAÑA DE BAMBU que se utilizaban para extraer la salmuera de los pozos profundos. Tenían una válvula instalada en el fondo, que se abría cuando el tubo se introducía en la salmuera y se volvía a cerrar cuando se elevaba.

La industria de la sal de Sichuan quedó interrumpida de 1640 a 1650 debido a las campañas militares que libraron los ejércitos Qing para conquistar China, lo que consiguieron; gobernaron durante más de 260 años. En ese tiempo la industria de la sal conoció un nuevo florecimiento. A mediados del siglo XVIII, al norte de Sichuan, en los distritos de Shehong y Pengxi, se producía la mayor parte de la sal procedente de pozos de China, pero a fines del siglo la oferta de combustible y sal de la región había ya decaído bastante. A medida que la producción y los beneficios disminuían, el gobierno de Sichuan recogía menos impuestos, así que se tomó la decisión de reformar las leyes que regulaban la industria de la sal. Redujeron la carga fiscal global y fomentaron la construcción de nuevos pozos.

El centro de la producción de sal se trasladó al sudeste, a Ziliujing en concreto, donde hoy está la ciudad de Zigong. La industria de sal de Ziliujing prosperó y se hizo con una

6. EL POZO DE XINHAI, cuya profundidad es de un kilómetro, era, cuando fue perforado en 1853, el más hondo del mundo.



considerable parte del mercado chino. La actividad económica de la región fue boyante durante el levantamiento Taiping, entre 1850-64. Los rebeldes bloquearon el comercio de la sal de mar hacia el valle del río Yangtze; los propietarios de pozos se convirtieron en los mayores abastecedores de sal de la región.

Los sichuaneses de Ziliujing refinaron el arte de la perforación de pozos, y crearon una industria sin parangón en todo el mundo. Sin abandonar los principios básicos de perforación, extracción y mantenimiento del siglo XI, desarrollaron la técnica en todas su posibilidades. Construyeron muchas variedades de perforadoras y enganches, y aumentaron el tamaño de los taladros y de los mecanismos de extracción; consiguieron, con ello, explotar ricos yacimientos de salmuera y gas natural ocultos en estratos profundos. Los sichuaneses del siglo XVI ahondaron hasta los 300 metros; sus descendientes llegaron a los 500 en el siglo XVIII y casi a los 900 a principios del siglo XIX. El famoso pozo de Xinhai, que tenía la asombrosa profundidad de un kilómetro, se construyó en 1835. Se construyó en 1842 el pozo más profundo fuera de China: no medía más que 535 metros.

Las hondas perforaciones de Ziliujing tenían una doble ventaja sobre los pozos menos profundos. La primera, que a una profundidad menor de 300 metros la salinidad de la salmuera rara vez sobrepasaba el 10 %; llegaba, sin embargo, hasta un 18 % a 800. La segunda, que un pozo de gas natural de mediados del siglo XVII sólo producía el gas suficiente para uno o dos quemadores, mientras que los profundos y prósperos pozos de principios del siglo XIX abastecían a varios centenares de quemadores. A medida que los sichuaneses de Ziliujing aumentaron la hondura de sus pozos, su producción de gas natural y de sal creció y creció: antes de 1720, la producción anual era de 35.000 toneladas; a principios del siglo XIX se había multiplicado por nueve.

Aunque en muchos aspectos la industria de la sal de Sichuan era una de las más desarrolladas de China, nunca consiguió el dominio absoluto del mercado chino. A mediados del siglo pasado, el establecimiento de un pozo de sal en Ziliujing costaba unos 3000 kilogramos de plata monetaria; difícil le era, pues, a la sal que produjese competir con la extraída mediante técnicas mucho más baratas. Los pozos eran rentables sólo en la remota provincia de Sichuan, donde perforar en busca de sal era más barato que importarla. Por esa razón sus técnicas no se extendieron a otras provincias.

La primera descripción europea de la "perforación china por cable", como la llamaban, aparece en el *Novus Atlas Sinensis* de Martino Martini, publicado en 1655, si bien es inexacta en muchos aspectos y apenas si se difundió. Los ingenieros europeos no sintieron gran interés por el método chino hasta la década de 1820. Llegaron por entonces noticias de los pozos de Ziliujing gracias a un misionero francés, L. J. M. Imbert.

Se intentó entonces repetidas veces copiar en Europa el sistema de los chinos, y, allá por 1840, se consiguió alcanzar con él los 100 metros de profundidad. La pobreza del resultado se debió sobre todo a que se utilizaron cuerdas en vez de los cables de bambú, más fuertes y elásticos. Se mejoraron por fin las técnicas originales gracias al uso de cables de hierro y motores. Pero el método por el que los europeos se inclinaban era la perforación por percusión con barras macizas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SALT AND CIVILIZATION. Samuel A. M. Adshead. Macmillam, 1992.

SALT PRODUCTION TECHNIQUES IN ANCIENT CHINA: THE AOBO TU. Yoshida Tora. Traducción inglesa y revisión de Hans Ulrich Vogel. E. J. Brill, 1993.

Ecología de los ríos mediterráneos

Las variaciones de caudal propias de los ríos mediterráneos imprimen un carácter único a la dinámica fluvial. El biofilm superficial y la zona hiporreica desempeñan funciones clave en el reciclado de los materiales

Sergi Sabater, Francesc Sabater y Joan Armengol

Hasta hace poco, la ecología de las aguas continentales se circunscribía al estudio de los lagos. Contribuía a ello su relativa sencillez, ya que se trata de sistemas casi cerrados, cuyo funcionamiento se explica, en gran medida, por su propia dinámica. Los ríos, por contra, son sistemas abiertos, cambiantes a lo largo de su curso y sometidos al influjo del clima y las características de la cuenca; en consecuencia, hemos de abordar la red hidrográfica entera e interpretar los resultados de conjunto, tarea nada fácil si se trata de una cuenca extensa. Se entiende, pues, que los primeros estudios dividieran el río en segmentos distintos según la pendiente, la velocidad del agua y las comunidades que medraban allí.

Esa situación comenzó a cambiar en los años sesenta, hasta imponerse, en los ochenta, la teoría del gradiente continuo aplicada al río. De acuerdo con dicho modelo, las características físicas, químicas y biológicas de un río inalterado varían a lo largo de su recorrido siguiendo gradientes predecibles. El nuevo enfoque ha constituido un marco conceptual donde acomodar los resultados y ha servido de punto de referencia para proponer hipótesis alternativas; además, ha introducido un método experimental gracias al cual se conocen mejor el funcionamiento de esos ecosistemas y se abre el camino para establecer criterios en que apoyar su gestión.

La región mediterránea, semiárida, experimenta una amplia variabilidad climática interanual, condiciones que confieren a las aguas continentales rasgos propios; así, faltan grandes lagos en las zonas no montañosas, y los ríos presentan fluctuaciones de caudal que lo mismo producen inundaciones catastróficas que se secan en estiaje.

La actividad humana es, junto con el clima y las características geomorfológicas y ecológicas de la cuenca, otro factor incidente sobre las aguas continentales. En la zona mediterránea sus efectos se han agudizado en lo que va de siglo, paralelamente con el crecimiento demográfico, pero su origen se remonta en la historia. Los embalses más antiguos de Europa (Cornalvo y Proserpina) se encuentran en Extremadura y datan de la época romana, igual que algunos sistemas de aprovechamiento del agua y de prevención de inundaciones. En los últimos años el incremento en la demanda de agua y de suelo utilizable ha llevado a la construcción de embalses y sistemas de regadío, la canalización de cauces y un sinnúmero de actuaciones menores sobre la mayoría de los ríos.

Mientras la densidad de población se mantuvo baja, la utilización de los ríos para deshacerse de las aguas residuales no encerraba mayores problemas: los ríos son sistemas de transporte que en su recorrido autodepuran total o parcialmente los vertidos que reciben. Pero la situación ha cambiado. Por un lado se aprovecha su caudal hasta dejarlos casi exhaustos y, por otro, van a parar a ellos las aguas residuales, convirtiéndose durante el estiaje en cloacas a cielo abierto. Esa tendencia se ha acentuado tanto que, en muchos casos, la actividad humana es el elemento determinante de su funcionamiento como ecosistemas.

Las redes fluviales son sistemas de drenaje hacia el mar del exceso de lluvia que cae sobre los continentes respecto de la evaporación total. Transportan sales en disolución y sólidos en suspensión y acogen el desarrollo de organismos que, con su intervención, añaden un componente diferenciador al funcionamiento de los ríos.

En la península Ibérica las cuencas que vierten al Mediterráneo representan un 31 % de la superficie total. Cuando los ríos son de régimen nivopluvial, no suelen secarse aunque sufran notables oscilaciones de caudal. En zonas de precipitación escasa presentan un régimen intermitente y se secan en verano. Tomaremos como ejemplo conductor del artículo el comportamiento del río Ter, que simboliza bien la dinámica hidrológica de un río mediterráneo permanente. Nace en los Pirineos y desemboca, después de un recorrido de aproximadamente 200 kilómetros, en el Mediterráneo. Su régimen hidrológico en la mitad superior difiere del que muestra en el resto de su recorrido. En la parte superior, las aportaciones medias de caudal mensual de 1954 a 1988 evidencian un comportamiento bimodal, característico de la mayoría de los ríos de régimen mediterráneo. El máximo caudal anual se produce en mayo (28,6 Hm^3) y el segundo en noviembre (17,6 Hm^3). Entre ambos máximos se sitúan dos mínimos de magnitud similar en agosto (11,4 Hm^3) y en febrero (14,2 Hm^3).

En el tramo inferior el caudal del río está controlado por los embalses de Sau, Susqueda y, en menor medida, de Pasteral. Además, se desvían alrededor de 6 m^3/s para suministro de la ciudad de Barcelona.

Aunque las regularidades en las fluctuaciones de caudal encierran un sentido estadístico, no predictivo, revisten obvio interés para la gestión de los recursos hídricos de una cuenca. El carácter estacional de tales fluctuaciones no impide que se produzcan frecuentes desviaciones del

SERGI SABATER, FRANCESC SABATER y JOAN ARMENGOL se hallan adscritos al departamento de ecología de la Universidad de Barcelona, donde los dos primeros son profesores titulares y el tercero catedrático de la disciplina. S. Sabater se doctoró en 1987 con un estudio ecológico de las poblaciones de algas del río Ter. F. Sabater se ha dedicado a los factores físicos y químicos fluviales. Armengol, que empezó trabajando en biología de los embalses, ha extendido su campo de investigación a la dinámica de los ríos.



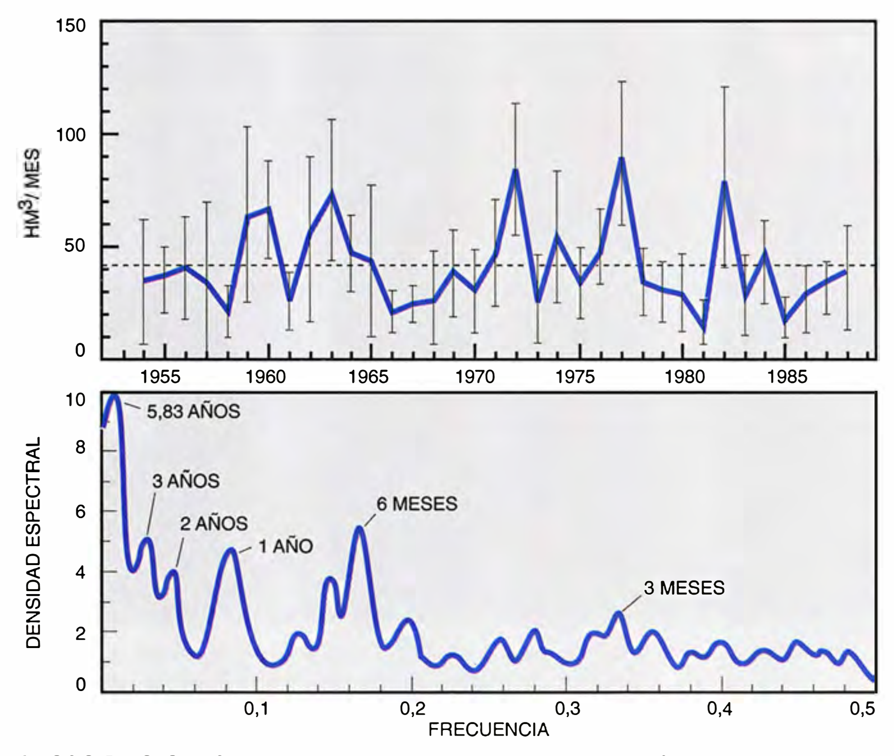
1. TRAMO MEDIO DEL RIO TER antes de su entrada en el pantano de Sau. En esta imagen de satélite, en falso color, aparecen en azul los núcleos urbanos y, en rojo, los campos de cultivo. En los últimos 20 años ha aumentado notablemente en esta zona la actividad industrial y ganadera con el consiguiente incremento y concentración de la población en ciudadades cada vez mayores. La evolución de la cuenca ha llevado a un descenso de la calidad del agua del río y a un cambio en la composición de las comunidades de organismos que viven en él. Esa tendencia se pretende frenar con un plan de saneamiento ya en marcha. La evolución de la cuenca se ha podido seguir a través de la progresiva eutrofización del pantano de Sau. (Foto cedida por cortesía del Instituto Cartográfico de Cataluña.)

patrón; el estudio de los datos revela que, junto con ciclos de 3 y 6 meses, aparecen ciclos menos importantes, pero próximos a los estacionales, que indican que el verano se alarga o la primavera llega antes de lo esperado. Al margen de estos ciclos cortos, emergen otros mucho más largos con períodos que oscilan entre 7 y 11 años, relacionados con fluctuaciones climáticas.

Los ríos van aumentando progresivamente su caudal a lo largo de su recorrido según una función potencial del área drenada. Tal relación implica que, cuando convergen afluentes de similar magnitud, se produce un incremento instantáneo de caudal que rompe con una previsible tendencia de progresión lineal. Se da, pues, una alternancia de cambios progresivos y discontinuos que afectan significativamente a la estructura y el funcionamiento del río.

Cambios semejantes se detectan en los sólidos disueltos y en suspensión que transporta el río. La cantidad total de sólidos en suspensión en un punto determinado guarda relación directa con el caudal. En el Ter, esa cuantía es baja en la cabecera (de uno a cuatro miligramos por litro) y aumenta progresivamente a lo largo del tramo medio; en los puntos que drenan zonas perturbadas o con materiales susceptibles de ser erosionados se registran incrementos bruscos. Los embalses, sin embargo, actúan como cubetas de decantación, por lo que, si aguas arriba de ellos se hallan valores cercanos a 80 miligramos por litro, a su salida este valor se reduce hasta 10 mg × litro y el río recupera la transparencia.

Las variaciones de caudal intensifican los cambios espaciotemporales en el transporte de compuestos disueltos y particulados. En el Ter se ha detectado una relación inversa entre el caudal y la concentración de la mayoría de los iones en disolución, sobre todo de fósforo, nitrógeno y carbono, nutrientes limitantes para el desarrollo de los productores primarios y las bacterias. Durante las épocas de mayor caudal se registra un descenso, por efecto de la dilución, de las formas de fósforo tanto orgánicas como inorgánicas. En los episodios de crecida súbita de caudal, la tendencia puede invertirse debido a los aportes difusos de aguas de escorrentía que recogen lixiviados provenientes de las granjas y al lavado de suelos agrícolas y forestales. El efecto descrito puede variar considerablemente en función de la hidrología anual. El incremento de las concentraciones de nitratos que presentan las aguas del Ter después de una avenida en un año considerado seco es más del 60 % de sus concentraciones basales. En cambio para años húmedos, el incremento no supera el 10 %, e incluso en algunos casos las concentraciones de nitratos disminuyen.



2. OSCILACIONES de los caudales medios mensuales del río Ter a lo largo del período 1954-1989 (*arriba*) y fluctuaciones temporales más importantes (*abajo*) obtenidas mediante análisis de Fourier de los caudales mensuales del mismo período.

Las características geomorfológicas de la cuenca y los procesos que allí se desarrollan influyen directamente en la composición del agua del río que la drena. También el caudal medio, la anchura del río y el tipo de sustrato que forma su lecho se deben, en buena parte, a la interacción entre el clima y la cuenca.

La cuenca hidrográfica es un sistema abierto donde se desarrolla una interacción asimétrica entre dos ambientes vinculados, el terrestre y el acuático. El medio terrestre controla y modifica, hasta cierto punto, la cantidad y las características físicas y químicas del agua que circula hasta el río. Se calcula que, por término medio, la escorrentía superficial es del orden del 25 % al 40 % de la precipitación total sobre la cuenca. Si el agua no es interceptada por la vegetación o no se evapora, se infiltrará a través del suelo. En cuencas poco forestadas asistimos a la formación de ríos de estructura hidrográfica poco ramificada y de gran poder erosivo; en estos sistemas, el aumento de sólidos en suspensión y nutrientes puede ser de varios órdenes de magnitud después de una avenida. En cambio, este efecto es mucho menor en ríos situados en cuencas más forestadas o con vegetación en equilibrio con el clima: las raíces sujetan el suelo e incrementan las tasas de infiltración normales, facilitando la jerarquización de los cursos fluviales.

La causa principal de la variación de caudal es la lluvia. El análisis de los hidrogramas realizados inmediatamente después de una tormenta, basados en la interpretación de la velocidad con que se reduce el caudal o señal de descarga hasta su nivel basal, permite calcular la respuesta hidrológica de la cuenca. La magnitud de la respuesta está determinada por la cantidad y distribución espaciotemporal de la lluvia caída y por las condiciones antecedentes de humedad, que dependen de la capacidad de saturación hídrica de los suelos y de la reserva de agua subterránea. Así, en los suelos secos y permeables de la región mediterránea, la mayor parte del agua queda retenida en el suelo, a no ser que se trate de una precipitación muy intensa; las únicas zonas saturadas de agua se encuentran en las proximidades del cauce, por cuyo motivo la respuesta hidrológica se produce de forma inmediata después de una precipitación.

En la respuesta de la cuenca interviene también la vegetación. Como

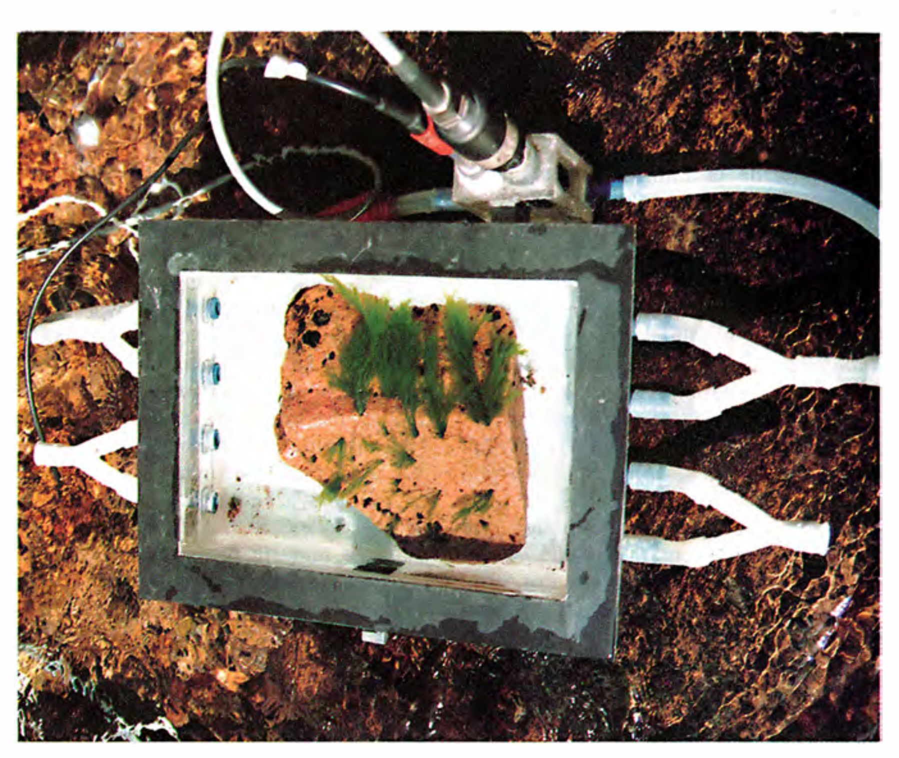
ha demostrado J. Piñol, de la Universidad Autónoma de Barcelona, existe una estrecha dependencia entre el potencial de evapotranspiración y las precipitaciones registradas, dependencia que no se da entre precipitación y caudal. Esta situación contrasta con los resultados encontrados por Likens y sus colaboradores en una cuenca experimental de Hubbard Brook (New Hampshire), donde el clima es atlántico y, por tanto, mucho más húmedo y frío: las variaciones de caudal muestran una evidente dependencia del nivel de precipitaciones. En Hubbard Brook y otras regiones donde el nivel de precipitación es mucho más alto que la evapotranspiración, se drena siempre el exceso de agua caída; en la región mediterránea, la demanda potencial de evapotranspiración suele ser más elevada que la cantidad de lluvia y, por ende, los registros de caudal, después de un período seco, no reflejan la cantidad de agua caída.

En los ríos mediterráneos adquiere una especial relevancia la zona subsuperficial o hiporreica, auténtica interfase entre el ambiente terrestre y el acuático de la cuenca y conexión, al propio tiempo, entre el medio acuático superficial y el subterráneo. J. Ward, de la Universidad de Colorado, sugiere que el medio hiporreico forma una zona de fuerte gradiente vertical de condiciones ambientales en la que se producen intercambios de materia y energía entre las aguas superficiales y las subterráneas.

Los cambios de caudal del río reflejan las interacciones entre la zona superficial del río y la hiporreica. Así, un aumento de caudal no sólo afecta a la estructura de las comunidades que viven en la superficie, sino que puede vaciar o rellenar la zona hiporreica de material detrítico, con obvios efectos para la fauna que habita en los espacios intersticiales. La fauna hiporreica vive a expensas de la materia orgánica atrapada entre el material aluvial y puede llegar a soportar, entre otras condiciones, concentraciones bajas de oxígeno disuelto.

En los ríos, los organismos están adaptados a desplazarse, alimentarse y reproducirse bajo una capa fluida en constante movimiento. Su morfología corporal, lo mismo en vegetales que en animales, converge hacia ciertas formas comunes, que tienden hacia un hidrodinamismo óptimo. Las fluctuaciones de caudal les exigen adaptaciones adicionales.

Animales y vegetales han desarrollado estrategias adaptativas diversas para sobrevivir en épocas secas. Algunos tienen estadios resistentes (ciertas algas), mientras que otros buscan la humedad enterrados en el medio hiporreico (larvas de insectos) o bien se refugian en ambientes húmedos freáticos cercanos (crustáceos). Otros, así los insectos acuáticos, han acoplado sus ciclos vitales a la producción de una fase adulta y voladora que tiende a sincronizar su emergencia con los momentos críticos de las fluctuaciones. El desafío es evidente: si perecen antes de alcanzar la madurez, mermará el número de individuos que completen el ciclo biológico, con el peligro consiguiente para la continuidad de la especie en el río.



3. CAMARA DE INCUBACION que encierra una roca colonizada por un biofilm. Los tubos laterales están conectados a una bomba de recirculación sumergible, que remueve el agua contenida en la cámara. Se instalan electrodos para el seguimiento permanente de las variaciones de oxígeno y de *p*H.

Los súbitos incrementos de caudal comportan cambios importantes en el tipo de flujo y en la fuerza física que los organismos tienen que vencer. En cada crecida y en función de su intensidad, los mejor adaptados se libran del arrastre por la corriente. En los ríos intermitentes del Canadá, sujetos a fuertes variaciones de caudal, D. D. Williams y Noel Hynes observaron que el número de especies de macroinvertebrados y peces, así como la abundancia de sus poblaciones, bajaba después de crecidas de tipo medio, para recuperarse a las dos semanas; pero cuando la avenida era mucho mayor, hasta el extremo de alterar el cauce, la mayoría de los organismos eran arrastrados y la recuperación de las comunidades del río se demoraba mucho más. La recuperación de las comunidades después de crecidas importantes puede ser muy rápida cuando se trata de microorganismos con intervalos de generación cortos, lo que facilita el establecimiento de otras especies de vida más larga.

En un ensayo llevado a cabo en condiciones simuladas en un río artificial, M. A. Lock, de la Universidad de Bangor, halló cambios notables en la estructura y en la actividad de la comunidad de microorganismos que coloniza las piedras del cauce al pasar directamente de condiciones de velocidad de 60 centímetros por segundo a 237 cm/s, manteniendo tales condiciones durante doce horas. Algunas de las diatomeas más adaptadas a condiciones de velocidades elevadas, como *Cocconeis*, resultaron dañadas, y la concentración de bacterias sobre la piedra disminuyó. Sin embargo, dos días después de restablecer las condiciones iniciales de velocidad, la comunidad volvía a manifestar las características de actividad precedentes.

Observamos un fenómeno parecido en la naturaleza. La avenida que se produjo en el río Ter el 8 de noviembre de 1982 alcanzó los 802 metros cúbicos por segundo de agua a la entrada en el embalse de Sau, lo que produjo el arrastre y desaparición de buena parte de las algas y de la

mayoría de los macroinvertebrados. Las velocidades de recuperación hacia las condiciones originales fueron distintas: la comunidad de algas al cabo de un mes no difería significativamente de la anterior a la avenida, pero los macroinvertebrados necesitaron tres meses para recuperarse.

En el restablecimiento de las comunidades desempeñan un papel destacado los afluentes menos afectados por la crecida, que mantienen su capacidad potencial de colonizar el resto del sistema. La propia estructura jerárquica de la cuenca posibilita que la multitud de afluentes de orden inferior sean meras réplicas de unas mismas condiciones ambientales que determinan el asentamiento de comunidades fluviales paralelas. Por ello, curso abajo, el río cuenta con mayores oportunidades que los afluentes de cabecera para volver a restablecerse después de una avenida.

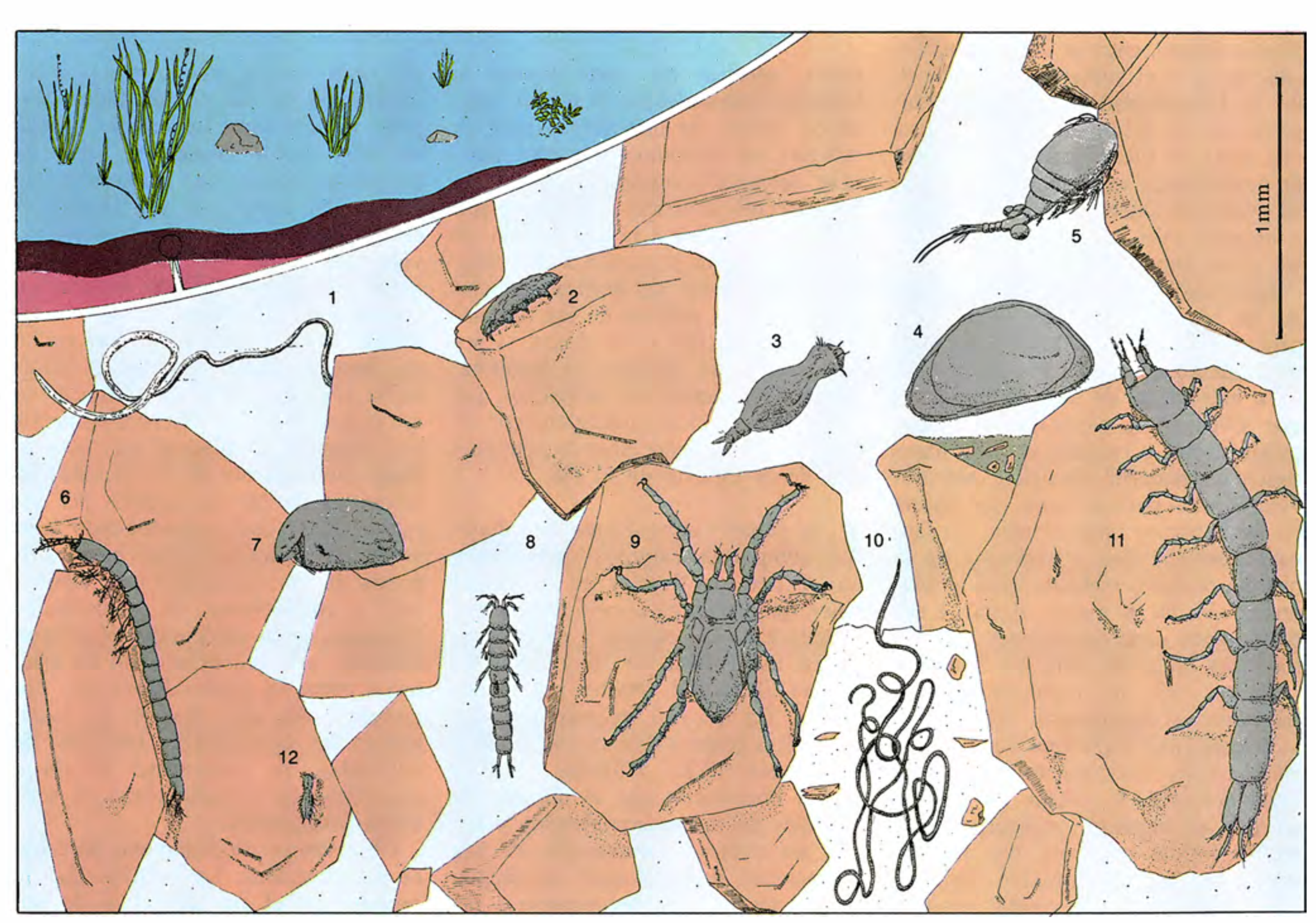
De forma similar el medio hiporreico puede proporcionar refugio a pequeños organismos frente a cualquier eventualidad. Se ha comprobado que éstos se desplazan hacia el medio hiporreico en busca de comida y refugio frente a adversidades tanto físicas (avenidas) como biológicas (depredación). Es común hallar un aumento de la densidad de organismos en el medio hiporreico después de una avenida.

El drenado de la cuenca hidrográfica implica un aporte neto de materia orgánica (hojas y ramas) y mineral (arenas, limos y nutrientes en disolución). La materia orgánica que procede de la cuenca se denomina alóctona para distinguirla de la que se produce en el propio río como resultado del aprovechamiento de la energía solar por los productores primarios que viven en él (algas, musgos y macrófitos), que se considera autóctona. Estos dos tipos de materia orgánica constituyen las fuentes de energía para los organismos heterótrofos del río.

En el largo proceso de descomposición de la materia orgánica, la resistencia a ser degradada ordena los materiales según su potencialidad energética. Bacterias y hongos colonizan las hojas, el material menos refractario; digieren parcialmente su cubierta celulósica y facilitan así su aprovechamiento por animales trituradores (principalmente tricópteros). El material ingerido por los insectos está aún por desmenuzar. La acción de desmenuzamiento operada por estos animales convierte la materia orgánica de mayor tamaño en particulada fina, capturada a su vez por otros animales.

Intervienen entonces las formas especializadas en la recogida de esos materiales finos. Las especies recolectoras toman el alimento del lecho del río; las especies filtradoras separan las partículas que transporta el agua, mediante órganos apropiados o con la construcción de redes. La materia orgánica particulada fina, rica en energía, puede ser aprovechada por organismos heterótrofos.

De la actividad de los organismos que procesan la materia orgánica particulada fina, de la lixiviación de la materia orgánica y de los materiales resultantes de la actividad de los productores primarios, se origina materia orgánica disuelta. En este apartado se incluyen los materiales hú-



4. ESQUEMA DE LA ZONA ALUVIAL del lecho del río y ampliación de un fragmento de la zona hiporreica. La disposición del sustrato mineral permite una intensa circulación de agua y de materiales a través de los intersticios. Se representan, asimismo, los grupos de invertebrados que habitan en los espacios intersticiales. Nótese la gran variedad de taxones y la convergencia de formas anatómicas, resultado de la adaptación a dicho medio: nemátodo (*1*), tardígrado (*2*), rotífero (*3*), ostrácodo (*4*), ciclópido (*5*), sincárido (*6*), quidórido (*7*), harpacticoide (*8*), hidracnela (*9*), oligoqueto (*10*), isópodo (*11*) y gastotrico (*12*).

micos —polifenoles y productos derivados de ellos— así como aminoácidos, hidratos de carbono, ácidos grasos, monómeros de lignina y productos de hidrólisis exoenzimáticas. Algunos de los componentes de la materia orgánica disuelta, pensemos en los hidratos de carbono, constituyen una fuente importante de energía, utilizada por microorganismos heterótrofos, principalmente bacterias y hongos, que crecen adheridos a substratos sólidos del lecho.

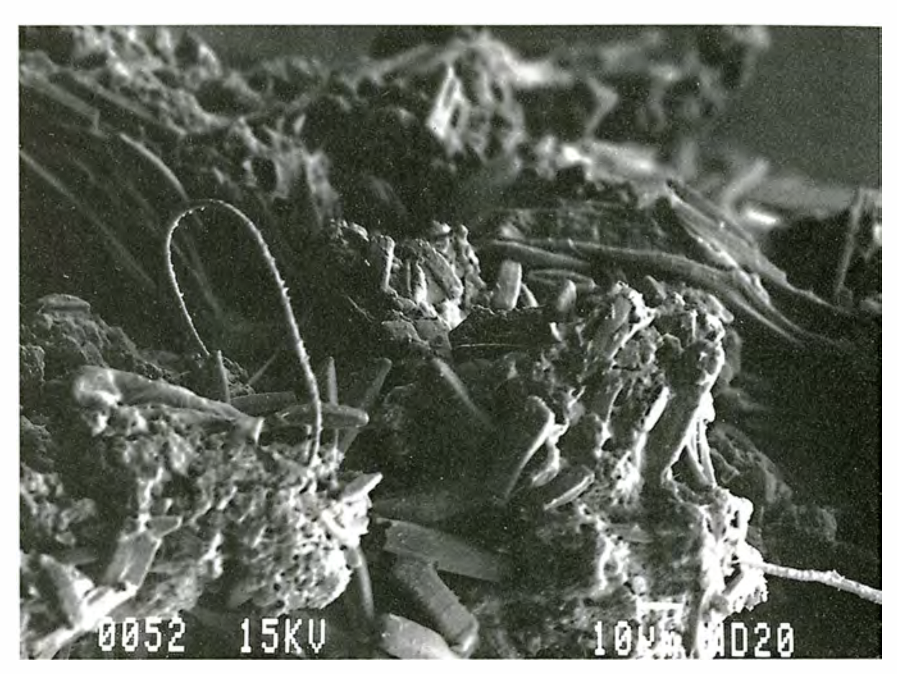
En algunos ríos tropicales de aguas negras o boreales que drenan suelos ácidos, la materia orgánica disuelta puede representar entre el 70 % y el 80 % del total de carbono que entra en el sistema fluvial. (La cantidad total de carbono que transportan los ríos indica la energía potencialmente aprovechable por los heterótrofos.) Esta proporción es mucho más variable en los ríos mediterráneos. Por ejemplo, en el Ródano la proporción es del 25 %, mientras que en el Tíber y el Po oscila entre un 70 y un 75 % del carbono total transportado.

El medio hiporreico ejerce un papel activo en la dinámica de la materia orgánica; sirve de almacén para la fracción transportada por el río e interviene en su procesado a través de la actividad metabólica de los organismos. En el medio hiporreico se retienen incluso moléculas de peso molecular elevado, por acción de las bacterias colonizadoras y por los procesos físicos de adsorción de partículas minerales y orgánicas.

Por otro lado, el flujo de nutrientes del hiporreos a la superficie no es nada despreciable. J. Stanford, investigando los ríos de Montana, determinó la existencia de zonas de descarga desde el medio hiporreico hacia la superficie que influyen en la composición y en el incremento de biomasa de la comunidad algal que tapiza las piedras. El flujo se halla condicionado por la naturaleza de los materiales aluviales que forman el medio hiporreico. Los cambios en la geomorfología del río a lo largo de su recorrido determinan la permeabilidad del sustrato y, por tanto, las zonas preferentes de descarga hacia el medio superficial. La reciente canalización de lechos fluviales y la pérdida de los márgenes inundables en el curso bajo de muchos ríos del área mediterránea —para reducir supuestamente el riesgo de inundación en la llanura aluvial— inciden de manera negativa en el procesado del material orgánico que reciben continuamente.

La luz que llega hasta el cauce es aprovechada por los organismos autótrofos. En los ríos mediterráneos, los organismos autótrofos bentónicos, es decir, aquellos que precisan de un soporte sobre el que vivir, abundan más que los que se mantienen en suspensión activa o pasiva (plancton). Los distintos autótrofos del bentos —algas, briófitos y espermatófitos— se hallan distribuidos según un patrón bastante habitual en los ríos mediterráneos; las algas tienen una distribución ubicua, los briófitos proliferan en aguas rápidas y los espermatófitos prefieren trechos tranquilos. A pesar de estas diferencias, los factores que regulan la producción son, hasta cierto punto, comunes: físicos (luz, temperatura, velocidad de la corriente y tipo y estabilidad del sustrato) y químicos (nutrientes y composición iónica de las aguas).

Las medidas de producción primaria recabadas en dos pequeños afluentes del río Ter —la Riera Major y La Solana— han permitido acometer las primeras comparaciones entre estos sistemas mediterráneos y ríos de otras regiones climáticas. La producción primaria de la comunidad bentónica se puede medir por los cambios en las concentraciones de oxígeno en cámaras que contienen una fracción representativa de dicha comunidad. Las cámaras de incubación, cerradas, están provistas de bombas que ponen en recirculación el agua y simulan el efecto de la corriente; al situarse en el mismo punto del río en que se ha recogido la muestra, se reproducen las condiciones de luz y temperatura originales.



5. ASPECTO DE UNA COMUNIDAD DEL BIOFILM en imagen obtenida con el microscopio electrónico de barrido. El conjunto es un entramado de materia mineral, diatomeas (formas regulares) y cianobacterias (filamentos).

La comparación de los resultados obtenidos en cámaras transparentes y oscuras permite medir, respectivamente, la producción neta y la respiración de la muestra, para extrapolar los resultados al conjunto de la comunidad bentónica. Los afluentes del Ter mencionados son de orden hidrológico bajo y no están afectados por ninguna actividad humana en su cuenca. La Solana es de sustrato geológico calcáreo y carece de vegetación riparia; el lecho está colonizado por una comunidad incrustante de cianobacterias, cubierta durante el verano por otra de clorofíceas filamentosas. La Riera Major, de sustrato silíceo y densamente forestada, presenta la superficie del cauce colonizada mayoritariamente por la rodofícea *Hildenbrandia rivularis*, sobre la que se desarrolla una delgada capa de diatomeas durante el otoño e inicio de la primavera.

La producción primaria de ambos tributarios sigue un patrón de fluctuación bastante regular a lo largo del año, que concuerda con la cantidad de luz que llega al cauce. En La Solana la vegetación no se interpone al paso de la luz hasta el lecho del río en ningún momento del año; por contra, en la Riera Major el desarrollo del bosque de galería sólo deja luz suficiente durante la parte final de otoño y el invierno, razón por la cual la producción anual es más elevada en La Solana que en la Riera Major.

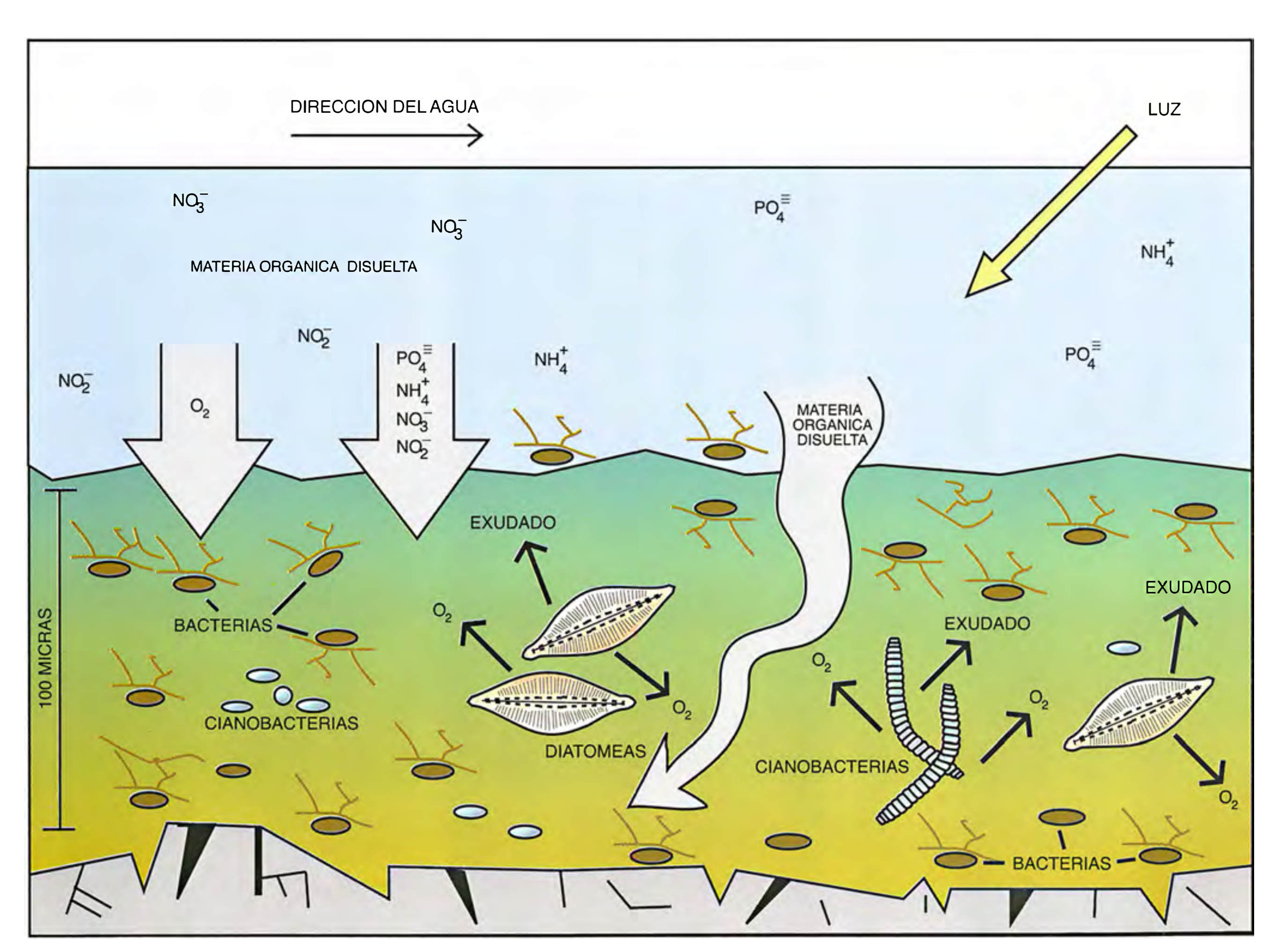
El balance entre la producción y

la respiración a lo largo de un día se denomina metabolismo diario neto e indica qué procesos metabólicos predominan, si los autótrofos o los heterótrofos. Cuando se sigue la evolución de los valores del metabolismo diario neto de un río a lo largo del año se tiene un buen descriptor del balance energético en distintos momentos. Según los resultados obtenidos, los dos tributarios ofrecen condiciones de heterotrofia casi permanentes, o lo que es lo mismo, muestran balances negativos. Tal observación concuerda en el caso de la Riera Major con la previsible importancia de la luz, ya que su escasez limita la producción de las algas y, por tanto, sólo se dan condiciones autotróficas —balance positivo— en invierno, cuando los árboles han perdido las hojas. En La Solana, el único período de autotrofia ocurre en primavera, pese a recibir luz suficiente durante todo el año. A la vista de estos resultados hay que concluir que, si bien la luz constituye un factor muy importante en el metabolismo fluvial, éste puede hallarse modulado por otros factores ambientales.

La Solana dispone de gran cantidad de luz y, a pesar de que la vegetación riparia sea poco importante, el aporte de materiales orgánicos disueltos es elevado. La existencia de condiciones heterotróficas debe buscarse, por tanto, en la misma estructura de la comunidad que forman los productores primarios, dispuestos en una incrustación en carbonato cálcico de varios milímetros de espesor. En su seno se asienta una comunidad bacteriana muy activa que determina el predominio de los procesos heterotróficos del conjunto.

Conviene detenerse en el análisis de la estructura y la función del complejo biológico que coloniza piedras, madera o cualquier otro sustrato sólido del lecho del río y tiene un papel central en el aprovechamiento de la materia orgánica disuelta y, por tanto, en el balance energético fluvial. Los heterótrofos —sobre todo bacterias y hongos— forman un entramado con otros microorganismos autótrofos, algas y cianobacterias. La matriz está constituida por polisacáridos hidratados, con propiedades difusivas semejantes a las de un gel. En el seno de la matriz se mueven asimismo protozoos y pequeños invertebrados. En general, la capa viva que coloniza estos sustratos sólidos puede alcanzar un grosor de entre 100 micrómetros y unos pocos milímetros. Esta microcapa funciona de modo similar a otras semejantes en lagunas saladas o en filtros de depuradoras de aguas. Al conjunto se le denomina genéricamente *biofilm.*

El papel de esta capa es clave en la dinámica energética del río. Destaca, entre sus propiedades físicas y biológicas, la capacidad para absorber o capturar el material disuelto. La capa retiene también los productos de hidrólisis enzimáticas extracelulares. Por su actividad, el biofilm constituye un auténtico microsistema que procesa los materiales disueltos



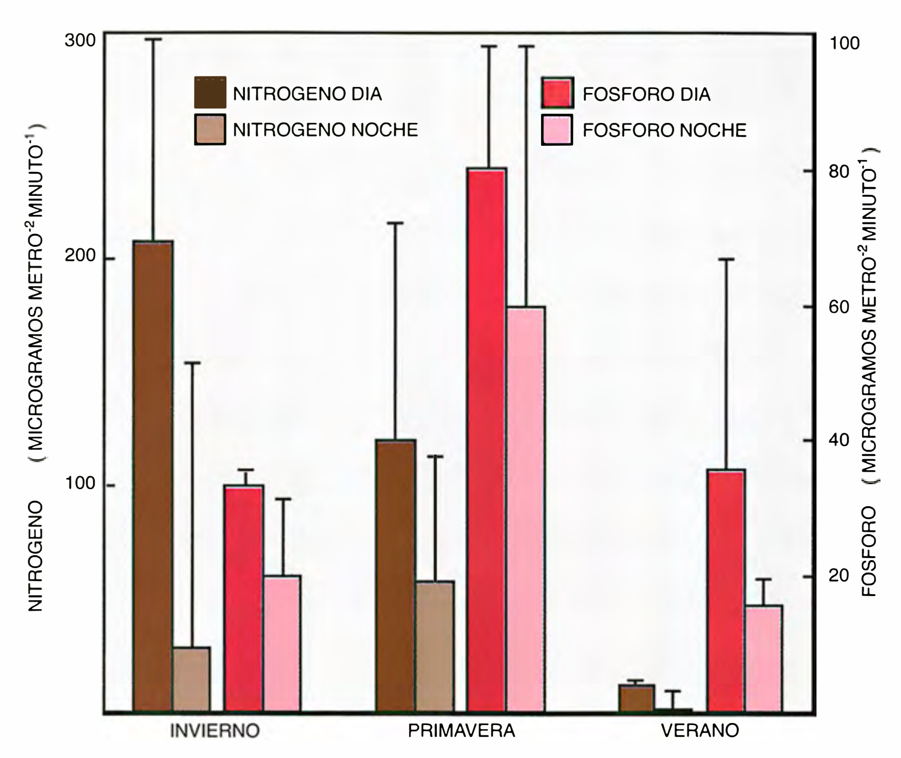
6. INTERFASE AGUA-BIOFILM, en representación esquemática. El biofilm tiene cierto grado de porosidad, lo cual permite la difusión de nutrientes inorgánicos, oxígeno y material orgánico disuelto desde el agua. En el seno del biofilm coexisten organismos autótrofos (algas) y heterótrofos (bacterias), que utilizan respectivamente la energía solar y la energía química. Presumiblemente, la eficiencia en el aprovechamiento de la energía se ve aumentada por las características estructurales del biofilm, que permite el intercambio de materiales entre autótrofos y heterótrofos.

y utiliza energía solar. Las algas absorben nutrientes inorgánicos y emplean la energía solar, mientras que los heterótrofos aprovechan la materia orgánica disuelta, así como los excedentes sintetizados por los productores primarios vecinos.

En los biofilms de mayor grosor se puede dar un alto grado de complejidad. Lo hemos comprobado en La Solana. El gradiente vertical de luz, nutrientes y potencial redox justifica posibles variaciones en la distribución de autótrofos y heterótrofos, e incluso de aeróbicos y de anaeróbicos, en las distintas capas. Aunque ignoramos cuál es la distribución vertical de gases disueltos y nutrientes en el seno del biofilm de La Solana, la existencia del funcionamiento heterotrófico sugiere que existe una importante actividad de bacterias heterótrofas. Es muy posible que tan sólo la parte superficial de la incrustación se halle controlada funcionalmente por los autótrofos (algas), y que el resto lo esté por organismos capaces de aprovechar la materia orgánica disuelta. Sin embargo, la existencia de clorofila activa en todo el grosor de la incrustación mueve a pensar que la partición funcional tiene un límite espacial difuso y, posiblemente, variable en el tiempo. La materia orgánica disuelta alcanza en La Solana valores elevados, de 1,3 a 2 miligramos por litro de carbono orgánico disuelto, que puede quedar atrapada en el biofilm por adsorción o por precipitación conjunta con el carbonato cálcico, para su consumo posterior por bacterias quimiolitótrofas o quimioorganótrofas.

La trascendencia del biofilm en la dinámica energética del río se pone de manifiesto al medir los cambios en la asimilación de nutrientes a lo largo del río. Podemos medir la disminución de la concentración de los nutrientes —corregida para la dilución— a lo largo de un tramo de río y calcular la distancia media que tarda el nutriente en ser incorporado por el sistema. Al efectuar esta medición en tramos de distintas características o en diferentes situaciones de luz y temperatura se obtiene un índice de la respuesta conjunta del sistema a la absorción del nutriente. Tales diferencias pueden ser atribuidas al tipo de substrato entre los dos tramos, aunque también a las diferencias entre los biofilms que hay en cada uno. En el caso de La Solana, con un medio hiporreico escaso, las diferencias se deben a la actividad del biofilm.

Para conocer si predominan los procesos de autotrofia sobre los de heterotrofia en el biofilm, podemos medir las diferencias en la velocidad de absorción de nutrientes entre el día y la noche. Si la absorción de nutrientes depende de la actividad fotosintética de las algas, que sólo es diurna, la diferencia en la velocidad de absorción de nutrientes respecto a las que se dan por la noche se deberán a los autótrofos, y éstos ocuparán un papel más importante que los heterótrofos. Así ocurre en La Solana por lo que se refiere al fósforo y al amonio, señal evidente de que la actividad de los autótrofos es primordial en el proceso de asimilación de los nutrientes.



7. FERTILIZACIONES LOCALES con nitrógeno y fósforo. Nos ponen de manifiesto variaciones notables en cuanto a las tasas de asimilación de dichos elementos por parte de los organismos. Del gráfico se desprende que las tasas de ambos elementos son mucho más altas durante el día que durante la noche. Las tasas de asimilación del fósforo son mucho más altas que las del nitrógeno durante la primavera y verano.

El río es un elemento del paisaje análogo en su función a los riñones del sistema circulatorio humano. Ambos son sistemas de drenaje que recogen, trasladan y modifican materiales que exportan o fuera del cuerpo o hacia el mar. Conocer la estructura, ensamblaje y funcionamiento del río pasa por explorar los diversos compartimentos del ecosistema fluvial. Entre éstos hay dos de interés fundamental y escasamente estudiados, la zona hiporreica y el biofilm.

Las variaciones de caudal propias de los ríos mediterráneos pueden imprimir un carácter especial a la dinámica de la zona hiporreica que no tienen los ríos de otras zonas climáticas. Por otra parte, la implicación del biofilm, como conjunto de organismos autótrofos y heterótrofos, en la dinámica de nutrientes es esencial en el balance energético del río y el reciclado de los materiales que transporta. Aunque el conocimiento de estos dos aspectos puede ayudar a responder cuestiones básicas de la ecología de los ríos como es el balance entre producción y respiración, su interés es también práctico.

Efectivamente, buena parte de nuestros ríos vierten aguas residuales ricas en materia orgánica y nutrientes. En estas condiciones conocer la forma y eficiencia en que estos materiales son procesados supone conocer la capacidad de autodepuración del río. No debería plantearse el uso de los recursos que proporciona el río soslayando las capacidades y limitaciones que tiene como ecosistema.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LIMNOLOGÍA. Ramón Margalef. Omega; Barcelona, 1981.

AQUATIC MICROBIOLOGY. ECOLOGICAL PROCESS. Dirigido por T. E. Ford. Blackwell; Oxford, 1992.

DYNAMICS OF NUTRIENT CYCLING AND FOOD WEBS. D. L. Angelis. Champan and Hall; Londres, 1992.

Ciencia y empresa

Biotecnología

Anticuerpos humanos

"Los anticuerpos clónicos: la esperanza de una revolución médica." Así lo proclamaba, el 5 de agosto de 1980, el titular más destacado del suplemento de ciencias del *New York Times.* Desde entonces, docenas de firmas del campo de la biotecnología han intentado que los anticuerpos monoclonales (ACM) —cultivados en tumores de ratones— sirviesen de fármacos contra esta o aquella enfermedad, desde el cáncer hasta las infecciones bacterianas. Por desgracia, tanta investigación apenas si ha dado fruto: sólo un fármaco terapéutico basado en los ACM —el OKT3, de Ortho Pharmaceuticals— ha sido aprobado por la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) estadounidense.

No obstante, parece que renace el entusiasmo por los monoclonales. Unas cuantas compañías perfeccionan técnicas de obtención de anticuerpos enteramente humanos, o "humanizados". Esperan, alentadas por los resultados de las primeras pruebas clínicas, que esta nueva generación de anticuerpos supere algunos de los problemas endémicos de los anticuerpos monoclonales de múridos.

El principal obstáculo con que tropezó el uso terapéutico de los anticuerpos múridos fue el propio sistema inmunitario que con ellos se trataba de reforzar. Muchos pacientes producen anticuerpos humanos antiratón (AHAR) cuando se les inyectan monoclonales múridos. La batalla que se entabla entonces entre proteínas humanas y de ratón reduce el efecto del fármaco, eliminado en poco tiempo de la corriente sanguínea, y a menudo causa de reacciones alérgicas. Además, como explica Robert E. Fildes, de Scotgen Biopharmaceuticals, "cuando se introduce un anticuerpo de ratón en un organismo humano, el sistema inmunitario no reacciona con la misma eficacia que frente a un anticuerpo humano".

Pero es difícil producir anticuerpos humanos fuera del cuerpo. Los monoclonales de ratón, descubrimiento que le valió el premio Nobel a César Milstein y Georges Köhler en 1975, se obtienen mediante la fusión de un linfocito *B* de ratón —leucocito del bazo, que produce anticuerpos pero es difícil de cultivar— con una célula maligna de melanoma; se produce entonces una célula híbrida inmortal, un hibridoma. En un tanque de fermentación, estas células crean anticuerpos y se multiplican sin cesar, lo que posibilita la producción masiva de anticuerpos múridos para casi cualquier antígeno que se inyecte en un ratón. Por desgracia, las células humanas *B* rehúyen el fundirse con células cancerosas.

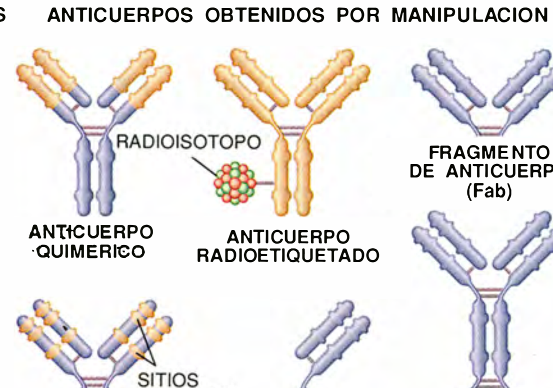
La capacidad que los ACM múridos tienen de dirigirse hacia un blanco celular concreto les ha propiciado un lugar en el lucrativo mercado de las pruebas de diagnóstico y de la detección por imágenes del cáncer. Incorporando radioisótopos en los monoclonales que se fijan a proteínas en la superficie de células cancerosas, pueden los médicos ver grupos de células malignas que serían invisibles con las técnicas acostumbradas de rayos X, tomografía de barrido o resonancia magnética. Y dado que los agentes que crean la imagen han de administrarse una o dos veces nada más, las reacciones de los AHAR carecen de importancia. Aun así, hasta ahora sólo ha sido autorizado un agente de esa naturaleza, un

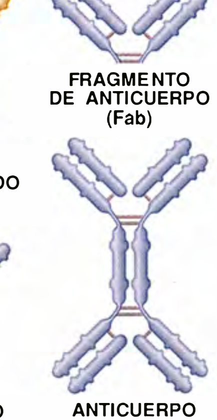
Anatomía de los anticuerpos

Los anticuerpos son a modo de variaciones de un tema musical. Los anticuerpos naturales (*izquierda*) son proteínas compuestas de cadenas de aminoácidos, trenzadas en complejas estructuras tridimensionales. Asen a los antígenos, o moléculas blanco, que casen con la forma y la química de los sitios de unión (*representados en rojo*) que se encuentran en sus brazos. Los genéticos pueden convertir anticuerpos de ratón en formas "humanizadas" (*derecha*) combinando los genes determinantes de sitios de unión múridos con los propios de una estructura humana.









monoclonal múrido que se emplea en el diagnóstico del cáncer de colon. "De hace diez años acá, los ACM de ratón han tenido un éxito rotundo en las pruebas de diagnóstico *in vitro*", dice Fildes. "Pero, en ese mismo período, no hay compañía que intentase desarrollar anticuerpos de ratón con fines terapéuticos que no fracasase de mala manera."

Es el caso de Xoma, que a punto estuvo el año pasado de que la FDA aprobara su fármaco antiséptico basado en los ACM. En las pruebas clínicas definitivas se demostró que el producto era poco eficaz. Xoma, desde entonces, se ha quedado sin su gerente, ha cancelado las pruebas clínicas de otros cuatro medicamentos y reducido en un veinticinco por ciento su personal. Sin embargo, hay tanto que ganar en este lance que numerosas compañías persisten en su búsqueda de ACM terapéuticos: en 370.000 millones de pesetas se estima el mercado potencial solamente para el cáncer.

Parece que la mayoría de las empresas especializadas en biotecnología coinciden hoy en que los anticuerpos terapéuticos sólo tendrán éxito si vencen a los AHAR. De ahí la importancia de que sean de procedencia humana. En realidad, los anticuerpos pueden engañar al sistema inmunitario del paciente aun cuando no sean del todo humanos. Basta con sustituir la región constante del anticuerpo múrido —que tiene forma de Y— por su equivalente humano para obtener un anticuerpo híbrido capaz de actuar, por así decirlo, subrepticiamente. Mejoró esta idea Greg Winter, del Consejo Británico de Investigaciones Médicas. A mediados de los años ochenta empalmó los genes de los sitios de unión de un anticuerpo de ratón —y sólo éstos— a los genes del resto de un anticuerpo humano; obtuvo así un anticuerpo "humanizado".

No obstante, cuesta cierto trabajo que la versión humanizada se fije a los mismos antígenos que la original. "A veces tenemos que manipular las secuencias de aminoácidos del armazón del anticuerpo humanizado a fin de que los sitios de unión caigan en la forma tridimensional adecuada", dice Fildes, cuya compañía ha aplicado la técnica de Winter a la humanización de más de veinte anticuerpos tomados de los ratones. "Saber cuáles hay que tocar es todo un arte."

Una joven empresa de California, Protein Design Labs (PDL), convierte esa maña en ciencia. Comparan, mediante modelaciones informáticas de proteínas, la secuencia de aminoácidos de los sitios de unión con una biblioteca de otros anticuerpos cuya estructura espacial se ha determinado por cristalografía de rayos X. Una vez el modelo ha identificado qué aminoácidos del ratón han de conservarse y cuáles deben reemplazarse, PDL sintetiza los nuevos genes y los inserta en células de mamíferos, que cultiva para producir los anticuerpos humanizados.

Hasta ahora, PDL ha humanizado más de una docena de anticuerpos contra virus, cánceres e incluso moléculas de adhesión que intervienen en las inflamaciones. En los tres ensayos clínicos realizados hasta la fecha con sus ACM humanizados, no se ha detectado ninguna respuesta de los AHAR, según el portavoz de PDL, Peter Dworkin.

Las más certeras armas de PDL no son, sin embargo, sus monoclonales en un 90% humanos, sino unos ACM enteramente humanos que proceden de unas cepas de células compradas a Sandoz en abril. Esta firma había conseguido aislar, a partir del bazo de la víctima de un accidente de automóvil, células *B* humanas generadoras de anticuerpos contra citomegalovirus, causa de una infección oftálmica que afecta al 20 % de los enfermos de SIDA y a menudo termina en ceguera. Fundiendo esta célula *B* con un hibridoma humano/múrido, Sandoz creó los "triomas", que medran en cultivo y producen muchos anticuerpos diferentes contra el virus. Por 560 millones de pesetas PDL adquirió cuatro de esos triomas, dos de los cuales —el anti-citomegalovirus y el anti-hepatitis B— han completado ya las pruebas clínicas iniciales de toxicidad y eficacia.

Los triomas dependen aún demasiado de la suerte y del trabajo para que se les pueda considerar de utilidad general. GenPharm International cree haber encontrado una vía mejor para obtener ACM humanos. Partiendo de su experiencia en la creación de animales transgénicos —que se usan como modelos en la investigación del cáncer y la fibrosis quística—, consiguieron un ratón que produce anticuerpos humanos únicamente. Inactivaron los genes de cada una de las dos cadenas de anticuerpos originarias del animal, y seguidamente se insertaron y activaron genes de cadenas de anticuerpos humanas. El resultado fue un linaje de ratones "capaces de producir cualquier anticuerpo humano, incluso los que responden a antígenos humanos", dice Jonathan MacQuitty, gerente de la firma.

GenPharm acaba de anunciar que, al cabo de cuatro años y con un costo de 1000 millones de pesetas, había creado un segundo linaje de ratones productores de ACM humanos. Lo han logrado transfiriendo enormes bloques de ADN de humanos a roedores por medio de cromosomas artificiales obtenidos, gracias a ingeniería genética, en células de levadura. Al contrario de lo que hace

Terapéuticas en desarrollo basadas en anticuerpos monoclonales.

Anticuerpos múridos

IDEC Pharmaceuticals: Pruebas de fase III* para un linfoma de célula *B*

ImmunoGen: Fase III, para diversos cánceres; fase I y II, para cáncer pulmonar de pequeñas células.

Immunomedics: Fases I y II, para cáncer colorrectal y linfoma de célula *B*

NeoRx: Fase I, para cánceres de pulmón y ovarios.

Anticuerpos humanizados

Cytogen: evaluación preclínica de cánceres de mama, pulmón y ovarios.

Genentech con NeoRx: Fase II, para cánceres de mama y ovarios.

IDEC Pharmaceuticals: Pruebas preclínicas de macaco "primatizado"/anticuerpo humano para artritis reumatoide.

Protein Design Labs. Fase II, para el síndrome de rechazo; fases I y II, para la leucemia mieloide aguda; pruebas preclínicas para cánceres de pulmón, colon y mama, inflamación, lupus y esclerosis múltiple.

Scotgen Biopharmaceuticals: Pruebas preclínicas de 12 anticuerpos contra el cáncer, citomegalovirus, VIH y placa ateromatosa.

Anticuerpos humanos:

Protein Design Labs: Completadas las fases I y II para la retinitis y hepatitis B; pruebas preclínicas para herpes y varicela.

*La aprobación de la venta de fármacos por parte de la Administración de Alimentos y Medicamentos estadounidense requiere generalmente que se superen tres fases de pruebas clínicas con personas: la primera, de seguridad y toxicidad; la segunda, de eficacia en pequeña escala; y la final, de efectividad estadísticamente apreciable.

con el resto de sus productos, GenPharm no va a vender este ratón. “Colaboraremos con los investigadores”, explica Howard B. Rosen, director de desarrollo de la compañía, “pero este ratón pone huevos de oro: no nos gustaría nada que la gente nos lo copiase por las buenas.”

Dentro de poco, quienes aíslen un anticuerpo humano podrán recurrir, para producirlo a gran escala en bacterias, a una técnica perfeccionada en el Instituto de Investigación Scripps. Dennis R. Burton, inmunólogo molecular de Scripps, multiplica ADN del anticuerpo y lo copia en virus “escaparate”. Cada virus, explica, es una pequeña unidad con el gen de un anticuerpo en su interior y la proteína codificada por ese gen en el exterior. Sobre una placa recubierta con el antígeno en cuestión se vierten los virus; los que contengan los anticuerpos adecuados al antígeno se fijarán, y los demás serán eliminados. Burton infecta con los virus seleccionados *Escherichia coli*, que de esta forma se convierte en una fábrica bacteriana de anticuerpos. El proceso tiene una seria limitación, admite Burton. Como las bacterias carecen del azúcar necesario para fabricar el tallo del anticuerpo, reproducen solamente los brazos del mismo; a este fragmento se le denomina Fab, y por sí solo neutraliza un buen número de virus, si bien, reconoce, no se sabe cómo.

Aun así, algunas firmas biotecnológicas van mirando con otros ojos estos anticuerpos fragmentarios. Un anticuerpo entero es demasiado grande para atravesar la superficie de muchos tumores; un pedazo, en cambio, puede llegar a sitios que a aquél le serían inaccesibles. Pero los fragmentos son eliminados del torrente sanguíneo en cuestión de horas. “Es un arma de dos filos”, dice Thomas J. McKearn, presidente de Cytogen. “Un ACM íntegro pasará por el lecho circulatorio del tumor muchas más veces que sus trozos.”

En Scotgen, y en otros centros, enlazan dos anticuerpos para crear un tercero “biespecífico” en forma de X; por uno de sus extremos se fija a una célula enferma y por el otro a un leucocito, con lo que arrastra a los soldados inmunitarios hacia el enemigo. Medarex inició hace poco pruebas clínicas con un fármaco de esta especie, concebido contra los cánceres de mama y de ovarios. Pero el proceso de fabricación de este tipo de productos —se lamenta Fildes— es largo, tortuoso y muy caro.

Sin duda alguna, todas estas técnicas son mucho más costosas que las de los viejos ACM múridos, y ni siquiera ofrecen garantías. El antiséptico monoclonal humano de Centocor apenas si pasó con mejor fortuna que la versión múrida de Xoma las pruebas definitivas de eficacia. De los 31.000 millones de pesetas que invirtió en su desarrollo, sólo ha recuperado un 12 % en ventas. McKearn ve en esto un signo de que es demasiado pronto para desechar los monoclonales de ratón. “Hay en la bibliografía farmacéutica todos los ejemplos que se quiera de gente que hizo caso omiso del sentido común y se subió sin más ni más al carro de la humanización”, afirma. Pero a veces el carro es verdadero carro de celebración, con sus guirnaldas, sus flores y sus regalos.

Fractales

Compresión de imágenes digitales

Cuando el investigador de IBM Benoit B. Mandelbrot publicó hace diez años *La geometría fractal de la naturaleza*, pocos imaginarían que las preciosas figuras de inagotable detalle que él llamó fractales podrían también un día mejorar la recepción de las emisiones de televisión y hacer que las imágenes sean parte del uso corriente del ordenador. Dos matemáticos del Instituto de Tecnología de Georgia, Michael F. Barnsley y Alan D. Sloan, sí concibieron tal perspectiva. Como quiera que las imágenes del mundo real suelen estar compuestas por numerosas configuraciones complejas que se repiten a diversos tamaños —en otras palabras, fractales—, creyeron que debía haber una manera de traducir las figuras a ecuaciones fractales. Las imágenes así codificadas requerirían menos datos —menos espacio de almacenamiento en disco—, y su transmisión sería más rápida.

Para 1987, dichos investigadores habían elaborado ya con suficiente precisión su idea como para patentarla, conseguir de inversores noruegos 62 millones de pesetas en concepto de capital inicial y crear Iterated Systems en Norcross. Pero no les ha sido fácil convertir en beneficio tangible la potencial rentabilidad de su invención. Encontraron un formidable competidor en la técnica de compresión de imágenes desarrollada por el Grupo Unido de Expertos Fotográficos (GUEF) de la Organización Internacional de Normalización. En ella se utiliza un método matemático bien conocido, la transformada de coseno discreta, para comprimir los ficheros en un 90 a 95 %, lo que equivale a relaciones de compresión entre 10:1 y 20:1. La técnica del GUEF presenta otra ventaja: al tratarse de una norma industrial, su uso es gratuito.

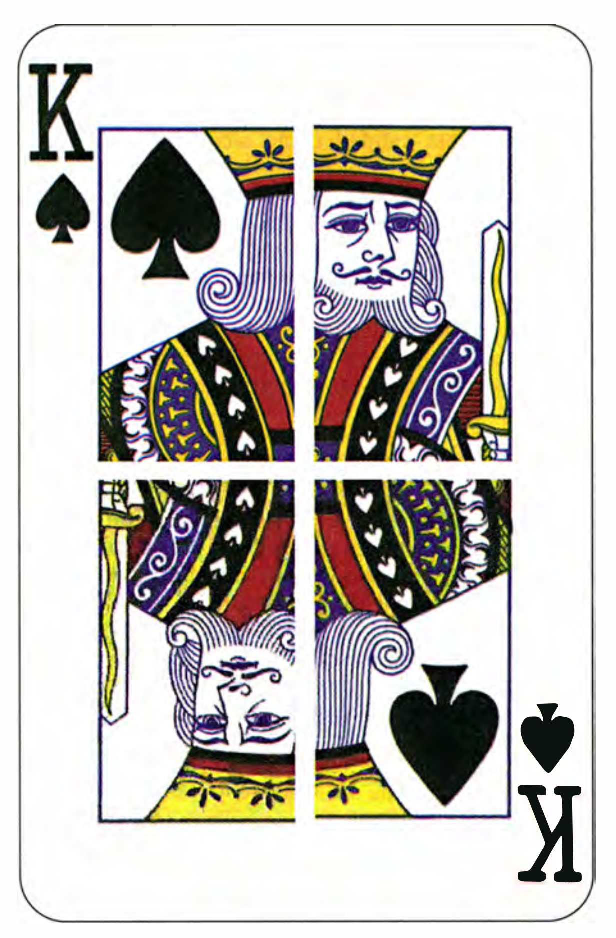
Las técnicas matemáticas que sustentan la compresión fractal, por otra parte, están todavía en mantillas. La compresión fractal ha empezado a estar a la altura, o a superar incluso, a la del GUEF en al menos tres características importantes: velocidad, calidad y robustez. Hasta cierto punto, las tres son mutuamente excluyentes: cuanto mayor es la compresión, menor el fichero de imagen, pero requerirá también más tiempo y creará más elementos espurios. La técnica del GUEF tarda tanto en descomprimir una imagen como en comprimirla, y la traducción en píxeles ofrece un aspecto característico de “enladrillado” cuando la relación de compresión excede de 20:1.

Iterated sigue una vía diferente. Su algoritmo trata la imagen como si se tratase de un rompecabezas que estuviese compuesto por muchas piezas solapantes, algunas de ellas similares. El soporte lógico toma cada pieza y, por medio de una fórmula fractal, transforma su tamaño, forma y color hasta que coincida con otra porción de la imagen. Aplicar tal proceso a cada pieza del rompecabezas lleva cierto tiempo; la compresión fractal es lenta. Pero produce un fichero de imagen mucho más pequeño, que no contiene nada más que los números necesarios para determinar las relaciones matemáticas entre las piezas, y no los que se necesitarían para dibujar realmente cada pieza.

Este enfoque ofrece ciertas ventajas. Reconstruir una imagen a partir de números es un trabajo relativamente rápido; el soporte lógico de vídeo de Iterated puede descomprimir decenas de imágenes por segundo sin necesidad de un equipo especial. La calidad depende de la exactitud de los números; conceder al algoritmo de compresión un tiempo más largo o un procesador que se dedique sólo a su cálculo proporcionará, pues, mejores imágenes. Y los elementos espurios que se generan a relaciones de compresión más altas dan a la imagen cierto efecto impresionista, que contrasta con la sensación de enladrillado típica de la otra técnica. Más: como las imágenes fractales se codifican mediante ecuaciones, no tienen *per se* tamaño, cualidad atractiva para los editores de programas, que quieren que sus productos funcionen en la pantalla de un ordenador portátil con la soltura con que operan en un mo-

nitor de 21 pulgadas. Barnsley espera que, a largo plazo, esa independencia respecto a la resolución será una ventaja decisiva de su método.

Hasta ahora, sin embargo, la mayoría de los clientes de Iterated han escogido la compresión fractal por su tremenda potencia. Microsoft adquirió una licencia de uso del soporte lógico de Iterated para comprimir las casi 10.000 imágenes que incluyó en Encarta, su enciclopedia en CD-ROM, porque "la compresión fractal producía, a elevadas relaciones de compresión, resultados mucho más agradables estéticamente que la del GUEF", dice el jefe del proyecto, Jay Gibson. Racal Radio, de Reading, recurrió a la compresión fractal en su sistema PICTOR por razones similares. "Queríamos enviar ficheros de datos por medio de ondas de radio de alta frecuencia, con las que en la actualidad no se pueden transmitir más que unos centenares de bits por segundo", explica Peter W. Goddard, director de mercadotecnia de Racal. "Gracias a los fractales pudimos reducir un fichero de imagen de 768 kilobytes hasta 10 kilobytes o menos, es decir, lo suficientemente pequeño para que la transmisión durase sólo dos o tres minutos."



LA TECNICA DE COMPRESION FRACTAL patentada por Iterated Systems reduce los datos mediante la traducción de la imagen a ecuaciones fractales. A mayor compresión, más se distorsiona la imagen. Según las agujas del reloj, desde arriba a la izquierda: Rey de espadas a su tamaño original de 2,4 megabytes, y después comprimido a 129, 63 y 31 kilobytes

Otras compañías juegan con relaciones de compresión aún mayores. Kalman Technologies añadió el videocorreo a su soporte lógico de comunicaciones HydraWorks gracias a la compresión fractal. "Conseguimos relaciones de compresión en torno a 600:1, que son imprescindibles para que salga rentable la transmisión de videocorreo por líneas telefónicas públicas", dice Steve Swift, presidente de la compañía. Peter A. Richardson señala que era el pan nuestro de cada día obtener por medio de los fractales compresiones de 100:1 en los programas educativos de la empresa que dirige, Tayson Information (con los que la Universidad de Guelph en Ontario ha realizado más de 500 módulos de cursos elementales). "Elegimos los fractales porque el procedimiento del GUEF está llegando al límite de sus posibilidades; el camino de los fractales, en cambio, se pierde en el horizonte."

Hay quienes dudan que vaya en realidad muy lejos. Barnsley pretende haber obtenido relaciones de compresión "efectivas" de hasta 2500:1. Pero "ampliar la imagen y después calcular la compresión respecto a la imagen ampliada no es más que un truco", observa Michael F. Shlesinger, quien, como director de la sección de física de la Oficina de Investigación Naval, financió las primeras investigaciones de Barnsley. Ante tal ardid, algunos matemáticos acusan a Barnsley de fraude. Shlesinger cree que la controversia tiene su raíz en un choque de mentalidades. "Barnsley ya no es un profesor; ahora es un empresario", dice; "va a una reunión de matemáticos, y en vez de darles una charla técnica les pone la cabeza como un bombo durante cuarenta y cinco minutos vendiéndoles su mercancía. Los matemáticos se suben por las paredes."

Pero no parece que la ira académica cause perjuicio alguno a los negocios de Iterated. A los cinco años de su registro, la compañía ha empezado a dar ganancias; sus ingresos vienen aumentando más de un 10 % mensual durante los seis últimos meses. La empresa tiene ahora más de 56 empleados (32 de ellos dedicados a investigación y desarrollo), ofrece alrededor de media docena de productos de compresión de imágenes e intenta abrirse camino en el naciente mercado del vídeo informático.

La compresión de vídeo es más compleja aún que la de imágenes fijas. La norma actual, recientemente preparada por el Grupo de Expertos en Imágenes en Movimiento (GEIM), está bien consolidada; pronto habrá una segunda versión. AT&T, Microsoft, Philips y otros gigantes del sector han anunciado que piensan vender este mismo año decodificadores de vídeo basados en la norma del GEIM.

No le importa a Barnsley. Puesto que a los fractales no les afecta la resolución, sostiene, terminarán, aunque no sea más que por eso, imponiéndose. A largo plazo, Iterated piensa producir pastillas ("chips") compatibles con la norma del GEIM que mejoren, mediante fractales, la recepción de las emisiones de televisión, y, a partir de ahí, abrirse paso en el campo de la propia emisión de televisión. Han conseguido una subvención de 250 millones de pesetas del Instituto Nacional de Pesos y Medidas para el desarrollo de una pastilla de compresión fractal destinada a la televisión de alta definición. "Una vez que hayamos introducido los circuitos de recepción, podremos ofrecer la manera de conseguir mejores transmisiones", dice Barnsley; "es la vieja táctica del caballo de Troya."

Mientras tanto, Barnsley ve otro posible campo para su empresa en los videodiscos compactos para ordenadores. Con la norma de la GEIM, la reproducción de vídeo requiere pastillas especiales de descompresión. Iterated se ha asociado con TMM, de Thousand Oaks, para desarrollar un soporte lógico que permita reproducir vídeo de calidad a partir de una CD-ROM, directamente. "Vamos a arrasar con nuestro vídeo en Comdex (feria comercial del ordenador)", se ufana Barnsley, "y en el otoño jugaremos fuerte en el mercado de vídeo para ordenadores personales." Pero Barnsley y sus matemáticos tendrán que acabar antes los deberes.

Política científica

La ciencia británica y la sociedad

Un primer ministro le preguntó a Faraday si merecían la pena sus investigaciones sobre la electricidad; éste, se dice, le contestó: "algún día la gravará usted con impuestos." Quizá haya que recordarles la anécdota a los sucesores de aquel primer ministro. Margaret Thatcher, pese a su declarada admiración por Faraday y a su título en química, dio durante los ochenta rienda tan suelta a la mano invisible de Adam Smith, que la inversión en investigación y desarrollo en Gran Bretaña es ahora menor, en relación a su producto interior bruto, que la de los EE.UU., Francia, Suiza, Alemania o Japón.

Una política que prohibía la intervención gubernamental en "la investigación y desarrollo cuasi de mercado" ha castigado aún más la magnificencia técnica de Albión. La estrategia se fundaba, claro está, en que, según se creía, la industria se haría con todo aquello de lo que el gobierno se desprendiese, mientras tuviera algún valor. Pero el plan no dio resultado. La Confederación de la Industria Británica (CIB) señala que el número de patentes disminuyó un 6,4 por ciento entre 1985 y 1990 en el Reino Unido; aumentó, en cambio, en los EE.UU., Alemania y Japón.

Parece que el declive de la industria británica ha convencido al primer ministro, John Major, de que vale la pena darles algún apoyo a los Newton, Watt y Darwin del siglo que viene. Durante los últimos meses, el gobierno ha llevado a cabo una revisión a gran escala de su política; quiere ahora estimular a la gallina científica para que ponga más huevos de oro. Como en los EE.UU., donde la administración Clinton ha emprendido una política tecnológica activa, cada vez se habla más de que el gobierno ha de desempeñar un papel en el fomento de la innovación.

La tarea le ha sido asignada a William Waldegrave, graduado en humanidades, de hablar suave, que ostenta el título formal de Canciller del Ducado de Lancaster. Es el ministro de ciencia y tecnología, cargo inexistente desde los años sesenta hasta su designación. En junio ha publicado las directrices —el *libro blanco*— que han de guiar la completa reestructuración de la ciencia británica.

Le han dado el trabajo casi hecho: su departamento ha recogido más de 800 propuestas. La queja que más se oye es bien conocida en los EE.UU.: los británicos, gustan de decir tanto los universitarios como los miembros de la administración, hacen ciencia de tanta calidad como siempre, pero la industria no es capaz de desarrollar productos comerciales a partir de sus hallazgos. La industria contraataca diciendo que el gobierno debería ayudarla más. "No vemos indicio alguno de que haya una dirección estratégica en la asignación de recursos", dijo en noviembre pasado Howard Davies, director general de la CIB.

Entrevistado en su oficina de Whitehall, Waldegrave señala que los índices de mención de artículos publicados indican que Gran Bretaña sólo cede en excelencia científica ante los Estados Unidos. "Gran Bretaña tiene una potente base científica", dice. Pero admite que "no dejamos de sentir dudas acerca de nuestra capacidad de aplicarla a fines sociales". Waldegrave, que tiene experiencia previa en investigación industrial y política científica, mantiene que el haber dejado la toma de decisiones a la industria ha hecho que el desarrollo técnico del Reino Unido "sea un tanto aleatorio e irregular".



William Waldegrave preside la primera reestructuración completa de la ciencia británica en casi veinte años

Le sería grato a la industria que el Reino Unido estatuyese desgravaciones fiscales por investigación y desarrollo similares a las existentes en los Estados Unidos. Pero Waldegrave es "bastante escéptico" en lo que se refiere a la política fiscal como medio para estimular la actividad económica. El gobierno ha desestimado también, por demasiado onerosa, la propuesta de que se fundasen los "centros Faraday", nombre que se daría a unos institutos para la transferencia de tecnología inspirados en los institutos Frauenhofer alemanes y encaminados a fomentar la relación entre los científicos que trabajan en centros públicos y los empleados por la industria.

De lo que se trata, cree Waldegrave, es de mejorar la ayuda directa a la investigación "estratégica" en áreas clave; el gobierno ha de concentrarse en una investigación que no sea ni pura ciencia por la ciencia, sin aprovechamiento ulterior alguno, ni mero desarrollo de productos. Y le gustaría ver "un poco más de coordinación y de intercambio estructurado" entre el gobierno, la industria y las instituciones académicas.

Causa en éstas cierta aprensión la preferencia por lo aplicado que el informe gubernamental manifiesta. Y Waldegrave insiste en que no puede prometer que las ayudas a la investigación civil vayan a crecer. No se pretendía que los más de 2 billones de pesetas planeados para el año fiscal 1993-94 supusiesen algo más que un modesto incremento respecto al presupuesto anterior; pero es que las organizaciones científicas dicen que la devaluación de la libra los han convertido en una auténtica merma.

Las estrecheces presupuestarias significan que es casi seguro que los empobrecidos científicos no conocerán alivio alguno. Las retribuciones, en comparación con las estadounidenses, son increíblemente bajas. Un investigador en ciernes que dependa del Consejo de Investigaciones Científicas e Ingenieriles, por ejemplo, habrá de sobrevivir los tres primeros años que siguen a la licenciatura con un estipendio de unas 900.000 pesetas al año, un tercio del salario nacional medio. El gobierno parece haber aceptado la necesidad de poner remedio a esta situación, y William D. P. Stewart, asesor científico del gobierno, ve con simpatía las propuestas de que se les faciliten a los jóvenes becas de investigación pura. Pero, advierte, "cualquier aumento de la ayuda a la investigación deberá ir acompañado de un aumento demostrado del rendimiento".

También desea el Reino Unido que se hallen formas de elevar la eficacia de los proyectos internacionales de la "gran ciencia", dice Stewart, que es botánico. El país, declara, no puede participar en la construcción de onerosas instalaciones de investigación cuya raíz es el "orgullo nacional" (una puya al supercolisionador superconductor norteamericano). Está a favor de la colaboración internacional cooordinada.

Quizás un espejismo

Los indicadores económicos pueden ser engañosos

Cada día mejor, cada día peor. A principios de este año, cuando EE.UU. anunció que el producto nacional bruto (PNB) se había apuntado otro trimestre de crecimiento, y al mismo tiempo recibían cupones de comida más ciudadanos que nunca, un observador ingenuo se habría sentido confundido.

Los indicadores que tanto se citan, el PNB, la tasa de desempleo, el índice de precios al consumo (IPC), ¿dicen realmente algo sobre el grado de bienestar económico del ciudadano medio? Si no es así, ¿sobre qué estadísticas deberían basar sus decisiones los responsables de la política económica? Algunos economistas —por ejemplo, Orley C. Ashenfelter, de Princeton— consideran la pregunta "anticuada" y de poca trascendencia; otros, como Amartya Sen, de Harvard, creen que habría que levantar la vista de las cifras puramente monetarias para concentrarse en indicadores como la mortalidad, el analfabetismo, el crimen y el número de personas sin hogar.

Nadie discute que las estadísticas macroeconómicas son inexactas y potencialmente engañosas, dice Christina D. Romer, de la Universidad de California en Berkeley. Pero añade que cuando su inexactitud mantiene un mismo sentido, son casi tan aprovechables como si fuesen correctas.

Por ejemplo, desde hace mucho abundan las quejas por que la tasa de desempleo no incluya a los trabajadores desanimados que ya no buscan empleo, con lo que se subestima el número real de personas sin trabajo. No obstante, aún así cabe comparar las cifras actuales con los datos anteriores de manera útil, "a menos que haya alguna razón para creer que esta recesión produce más trabajadores desanimados de lo habitual", dice Romer. (Parece, por cierto, que eso es lo que está pasando).

En períodos de pocos meses o incluso de un año, sostiene Victor R. Fuchs, de Stanford, los indicadores macroeconómicos habituales "son enteramente válidos". El número de trabajadores desanimados y, aún más, los hábitos de compra en que se basa el IPC o los factores ponderadores de la actividad industrial que se emplean en la determinación del PNB no cambian con tanta rapidez. Pero a lo largo de una generación, afirma, los cambios de estructura económica de una nación pueden hacer que los



El PNB per capita no es una medida fiable del grado de bienestar de los miembros de una sociedad, sea desarrollada, sea del tercer mundo. Su crecimiento no beneficia a todos, y no tiene necesariamente por consecuencia que la pobreza disminuya

datos pasados y presentes se tornen inconmensurables.

Y tal inconmensurabilidad se da, por ejemplo, y es un ejemplo básico, en los datos que sirven para estimar la productividad global de los EE.UU. Los estadísticos corrigen el efecto de la inflación refiriendo los precios de las distintas entradas a cierto año, en este caso 1987. Si bien es verdad que se necesita algún tipo de ajuste, indica Robert J. Gordon, de la Universidad del Noroeste, ese proceso de normalización distorsiona las cifras de mala manera, ya que, aunque los precios de la mayoría de las cosas han subido, los de algunas otras, como los ordenadores y los equipos electrónicos, han caído en picado. La productividad se ha subestimado en aproximadamente un punto de porcentaje en cada año anterior a 1987 (cuando los ordenadores costaban mucho más) y sobreestimado en la misma cuantía en los años posteriores (en los que su precio ha bajado mucho).

Por otra parte, además de distorsionar los indicadores, la cambiante estructura de la economía puede convertir estadísticas de ciertos tipos en algo fundamentalmente engañoso. "Desde la segunda Guerra Mundial hasta los setenta", comenta Greg J. Duncan, de la Universidad de Michigan, "la renta media daba cuenta de cómo les iba tanto a los niveles altos de ingresos y a los bajos".

Pero en los ochenta, observa Duncan, la desigualdad aumentó, con lo que las estadísticas de renta reflejaron la situación de muchos menos ciudadanos. Los ingresos de la quinta parte por arriba de la población aumentaron modesta pero apreciablemente mientras que los de la quinta parte de abajo sufrieron un brusco descenso. "La mediana es ciega", concluye.

Podría prestársele mayor atención a la distribución de la renta si los datos estuviesen más al alcance de la mano, arguye Duncan: en los EE.UU., donde los indicadores clásicos se publican de manera periódica y regular, la distribución de la renta o el número de personas que reciben asistencia pública se calculan, en cambio, con menor frecuencia y se publican por organismos dispares con retrasos que van de unos meses hasta casi un año. En España, igualmente, la distribución de la riqueza por segmentos de población es en general un dato mucho menos difundido que cualquier otro indicador.

Pero el descontento por la inexactitud de los datos no responde a la pregunta de si existe algún conjunto de cifras monetarias que permita juzgar el estado de la economía. Fuchs recuerda su niñez vivida en una zona de clase media en el Bronx durante los años treinta: "Hace unos pocos años llevé a mis hijos y nietos al lugar donde yo había vivido, y fue horrible: las tiendas tapiadas, las fachadas por los suelos..." Sin embargo, de acuerdo con el monto de sus ingresos corregido conforme a la inflación, los actuales residentes del Bronx son más ricos. La diferencia está, según Fuchs, en la salubridad, en la vulnerabilidad al crimen, en la calidad de la educación.

De hecho, el Banco Mundial ha abandonado en gran medida su fe en el crecimiento como meta del desarrollo. El Banco Mundial "pone ahora su mira en la reducción de la pobreza", declara Martin Ravallion, del departamento de investigación de políticas del Banco. "Hemos", dice, "rechazado explícitamente el PNB per cápita como medida del progreso".

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Empaqueta, que algo queda

Mario Esferol terminaba su primera jornada de trabajo como empaquetador de bolas de tenis en AlmaSport. "Mina, por favor, ¿podrías pasarme otras siete latas?", le pidió a su compañera. "Y ya puestos, pásame también el rollo de plástico de envolver."

"Ahora mismo. Déjame acabar con estos balones de baloncesto", respondió Guillermina. La joven cortó un trozo de plástico de buen tamaño y le pasó a Mario las siete latas de bolas de tenis y el rollo de plástico termorretráctil.

Mario cubrió su banco de trabajo con una larga lámina de plástico fino y transparente y colocó paralelamente sobre ella los siete envases, unos al lado de otros. Envolvió los siete envases con tanto mimo como una madre al ponerle los pañalitos a su bebé. Metió después todo el paquete en una máquina que tensó el plástico en torno a los envases. El plástico se ceñía con fuerza en los bordes del conjunto, aunque en la parte media quedaba todavía alguna flojedad. Mario asió el paquete con naturalidad... y su contenido se desparramó estrepitosamente por el suelo. El golpe sobresaltó a todos los operarios del almacén.

"¡Esferol! ¡Otra vez tú! ¡Ya te ha pasado lo mismo más de cien veces!", le abroncó el encargado.

"Lo siento mucho, jefe."

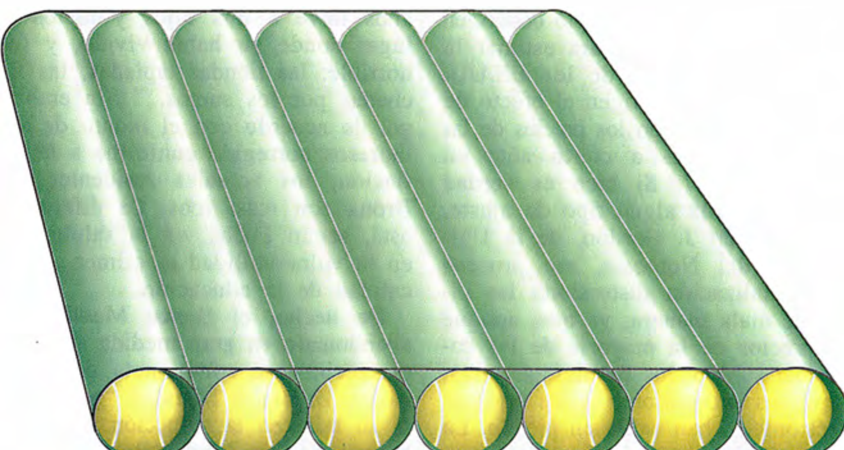
"¡Eres un manazas! ¿Te gustaría seguir trabajando aquí mañana?"

"Sí, señor."

"Pues más te vale que encuentres la forma de empaquetar esas latas como es debido. ¿Por qué no pruebas a hacer un grupo más compacto?"

"Pero, jefe, Mina empaqueta sus balones en línea, y hace como una salchicha", protestó Mario. "Y tensa el envoltorio lo mismo que yo, de forma que no haya flojedades ni huecos. O sea, que los paquetes siempre tienen forma convexa."

"Ya. Pero mis paquetes no se deshacen solos", terció Mina.



1. Podemos envasar siete cilindros de manera que se forme un haz, o adosándolos en hilera. ¿Cuál de estos dos empaquetamientos tiene menor volumen, y cuál menos probabilidades de deshacerse solo?

"Entonces, ¿por qué no pasa lo mismo con los envases cilíndricos?", preguntó el supervisor.

"Verá, jefe. Yo pienso que si el volumen total del paquete, incluidos los huecos interiores, es lo más pequeño posible, el paquete no se abrirá. Porque si se abriese, es que aún se podría haber empequeñecido más, y eso, como es el más pequeño, es imposible. Yo creo que tenemos que pensar en paquetes cuyo volumen, contando todo cuanto contenga el envoltorio, el aire, todo, sea lo menor posible. Y siempre con la condición de que el paquete sea convexo."

"Ya veo que el área de la superficie envolvente es mucho mayor cuando las latas se colocan en hilera", dijo el supervisor. "Evidentemente, el área depende de cuán larga deba ser la tira de plástico de envolver. Pero no lo tengo tan claro para el volumen."

"Supongamos que el radio de las latas sea igual a 1, para que el cálculo sea sencillo", dijo Mina. "Si las miramos desde arriba, lo que estamos haciendo es, en esencia, empaquetar juntos un montón de círculos y poner en torno a ellos una banda elástica. El volumen del paquete es proporcional al área encerrada dentro de la banda: el área de la superficie del envoltorio es proporcional a la longitud de la banda, suponiendo que al hacer el paquete no recubres los extremos de los botes."

"Correcto."

"Podemos, pues, hallar el área encerrada por la banda y la longitud de la banda. Resulta mucho más sencillo pensar en dos dimensiones. Ahora, si ponemos siete círculos en fila y los rodeamos con una banda buscando que ajuste bien y queden bordes convexos, el perímetro total será $2\pi + 24 = 30{,}283$."

"¿Y eso por qué?"

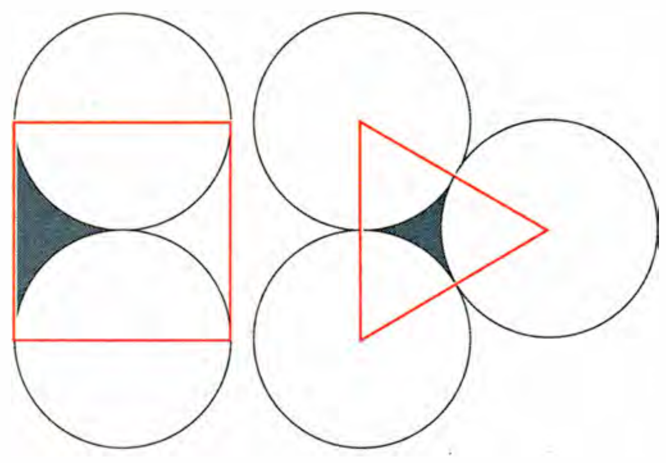
"Cada lado recto tiene longitud 12, porque mide seis diámetros, los de seis círculos. Y luego tenemos dos semicírculos, cada uno de longitud π."

"Vale."

"Pero si colocamos seis círculos en hexágono y otro más en el centro, el perímetro pasa a ser 12 + 2π = 18,283. El razonamiento es parecido. Tenemos seis lados rectos de longitud igual a un diámetro, y seis arcos, cada uno de ellos de un sexto de círculo."

"Ya veo, Mina."

"Así pues, el perímetro correspondiente al empaquetamiento hexagonal es sólo un poco más de la mitad de la longitud de la salchicha. Por eso se le deshacen a Mario todos los paquetes. En cuanto las latas se mueven un poquito, la envoltura se afloja."



2. Tres círculos empaquetados uno junto a otro dejan un hueco que es igual al área del triángulo menos la mitad del área de uno de los círculos. Por otra parte, el vano entre dos círculos y un lado es la mitad del área del cuadrado menos la mitad del área de uno de los círculos

"Pero Mina, lo único que has hecho es calcular el perímetro. ¿Qué me dices del volumen?"

"Me parece que podré aplicar el mismo método, jefe. Si colocamos las latas adosadas como en la salchicha, el área de la sección transversal del envoltorio podrá ser imaginada como seis cuadrados de lado 2 más dos semicírculos de radio 1, por lo que será en total 24 + π = 27,141. Por otra parte, si juntamos las latas en formación hexagonal, el cálculo del volumen será un poco más complicado. Es que cuando hay bordes curvos siempre pasan cosas bastante raras."

"¿No hay en los libros fórmulas para cosas así, Mina?"

"No en los que yo he manejado. A ver si puedo calcularla." Echó mano a un lápiz y un pedazo de papel. "Vamos a ver... Me parece que tendré que calcular las áreas de figuras de dos tipos, además de los círculos. Tenemos por una parte los 'huecos interiores', que tienen tres lados curvos, y por otra los 'huecos laterales', que tienen dos lados curvos y uno recto. Los huecos interiores son en realidad triángulos equiláteros a los que se les han suprimido tres sectores circulares de amplitud 60°. La longitud de los lados del triángulo es 2; por lo tanto su altura es $\sqrt{3}$ y su área, la mitad de la base por la altura, que es $(^1/_2) \times 2 \times \sqrt{3} = \sqrt{3}$. Reunidos los tres sectores resulta un semicírculo de área π/2. Por tanto, cada hueco central tiene un área de $\sqrt{3} - \pi/2 = 0{,}161$. Análogamente, dos huecos laterales, más dos semicírculos, forman un cuadrado de 2 × 2, cuya área es 4. Así pues, un hueco lateral más un semicírculo tendrán un área mitad de ésta, o sea, 2. En consecuencia, cada hueco lateral tiene un área de $2 - \pi/2 = 0{,}429$.

"Finalmente, el área de la envoltura hexagonal convexa de siete círculos se compone de siete círculos, seis huecos centrales y seis huecos laterales. El resultado es un área total de

$$7\pi + 6(\sqrt{3} - \pi/2) + 6(2 - \pi/2) = 25{,}533$$

"Esta área es menor que 27,141. ¿Se da cuenta? Esa es la razón de que las salchichas de Mario se deshagan solas. Así que yo creo que en lugar de eso tendría que hacer hexágonos."

"De acuerdo, muy bien", dijo Mario. "Pero no veo por qué no pasa lo mismo con esferas. Seguramente, si envolvieras tus balones de baloncesto en un grupo más cerrado, el volumen total, con envoltura y todo, sería menor que al colocarlos en línea."

"No necesariamente. Se trata de un problema complicado, tridimensional. No veo cómo podría empaquetar siete esferas en un grupo compacto sin dejar mucho espacio desperdiciado dentro del envoltorio. Con la disposición que yo les doy, o sea, con todas las bolas alineadas, el área de la envoltura es 28π, y el volumen interior es 40π/3. Pero cuando la disposición es otra, los cálculos matemáticos no son tan fáciles de hacer. De todas formas, mis paquetes no se deshacen. Así que tengo una demostración experimental de que lo que hago es correcto."

"Todo eso está muy bien", declaró el encargado, "pero muchas veces hay que formar paquetes que contienen mucho más de siete envases. ¿Qué forma deberían tener para que el volumen que encierren sea mínimo? ¿Qué le parece a usted, Esferol?"

"Algo así... algo así como un hexágono, jefe. Pero más grande, claro", dijo Mario.

"Como el hexágono, jefe, pero más grande", remedó el encargado con sarcasmo. "¿Cree usted que ha dado una solución medio decente, eh, Esferol?"

"No, señor."

"Y usted, Mina, parece que no sabe por dónde abordar el problema de las esferas. Sólo sabe calcular el volumen de una salchicha, y después da por sentado que con eso ya ha determinado el volumen mínimo."

La chica bajó la cabeza en gesto de disculpa.

"Van a ir ustedes a la biblioteca de la empresa y van a desenterrar toda la información útil que pueda haber allí. Estoy seguro de que alguien ha tenido que estudiar antes el problema. No vale la pena volver a inventar la rueda, ¿verdad?"

"Sí, señor", entonaron a dúo los dos chicos. "Queremos decir que no, señor."

A la mañana siguiente, el encargado encontró a Mina y a Mario dormidos en la biblioteca, con la cabeza apoyada en los libros abiertos que tenían delante. El corazón se le reblandeció.

"Buenos días. ¿Qué, pareja, habéis encontrado algo?"

"Sí, señor. Muchísimas cosas", dijo Mina, despertándose bruscamente.

"Soy todo oídos."

"Verá, jefe, el problema fundamental consiste en hallar disposiciones de esferas *n*-dimensionales en un espacio de *n* dimensiones que hagan mínimo el hipervolumen *n*-dimensional de su cápsula convexa... Bueno, me explico: la cápsula o envoltura convexa es el mínimo recinto convexo capaz de contener a todas las esferas. En dos dimensiones, el problema consiste en empaquetar círculos del plano y tratar de minimizar el área de la envoltura convexa; es lo que tenía que hacer Mario al empaquetar envases cilíndricos. En tres dimensiones hemos de empaquetar esferas, como mis pelotas de baloncesto, y tratar de hacer mínimo el volumen."

"Continúa."

"En dos dimensiones, se sabe que las mejores disposiciones son aquéllas que sean 'lo más hexagonales' posible."

"Mina, pensé que había encontrado usted una solución precisa."

"Bueno, verá, jefe, es que es un poco complicado. Tendré que explicarle las empaquetaduras de Groemer. Son empaquetaduras en forma de panal que hacen hexágonos. Los hexágonos no tienen forzosamente por qué ser regulares, pero sus lados han de ser paralelos dos a dos. Bueno, y puede que algunos 'lados' no lleguen a aparecer. Quiero decir que podríamos tener pentágonos y triángulos y figuras parecidas. Reciben su nombre de Helmut Groemer, de la Universidad estatal de Oregón, que demostró un teorema fundamental sobre el problema en 1960. Su teorema relaciona el área contenida en el interior de la cápsula convexa de un empaquetamiento de círculos con el perímetro de la empaquetadura y con el número de círculos del interior. Concretamente, en el caso de n círculos y de un perímetro p, el área total de la cápsula convexa no es inferior a

$$2\sqrt{3}(n-1)+p(1-\sqrt{3}/2)+\pi(\sqrt{3}-1).$$

"Además, el área coincide con esta expresión si y solamente si la empaquetadura es una empaquetadura de Groemer."

"¿Y con eso...?"

"Partiendo de esta aproximación por exceso, Gerd Wegner, de la Universidad de Dortmund, dejó el problema prácticamente resuelto en 1986. Wegner demostró que la cápsula convexa de un sistema de n círculos es minimal cuando están dispuestos en una empaquetadura de Groemer cuyos lados sean lo más iguales posible, al menos siempre y cuando n sea menor o igual que 120. El teorema también es verdadero cuando n sea un 'número hexagonal' de la forma $3k^2+3k+1$, caso en el cual existe un empaquetamiento de Groemer que forma un hexágono regular perfecto."

"¿Y quedan todavía casos por resolver?"

"En efecto. Pero en ellos la diferencia entre los mejores resultados conocidos y el óptimo teórico es muy pequeña."

El encargado movió la cabeza. "Mina, su respuesta no es todo lo precisa que yo esperaba."

"No, señor", dijo Mario, corriendo en ayuda de su compañera. "Pero nunca vamos a tener que envolver más de 120 envases en un mismo paquete."

"Puede que sea así. Pero es irrelevante para el problema teórico", opuso el encargado.

"Lo más curioso es que en el caso de tres dimensiones la solución es completamente diferente, por lo menos cuando el número de bolas es más bien pequeño."

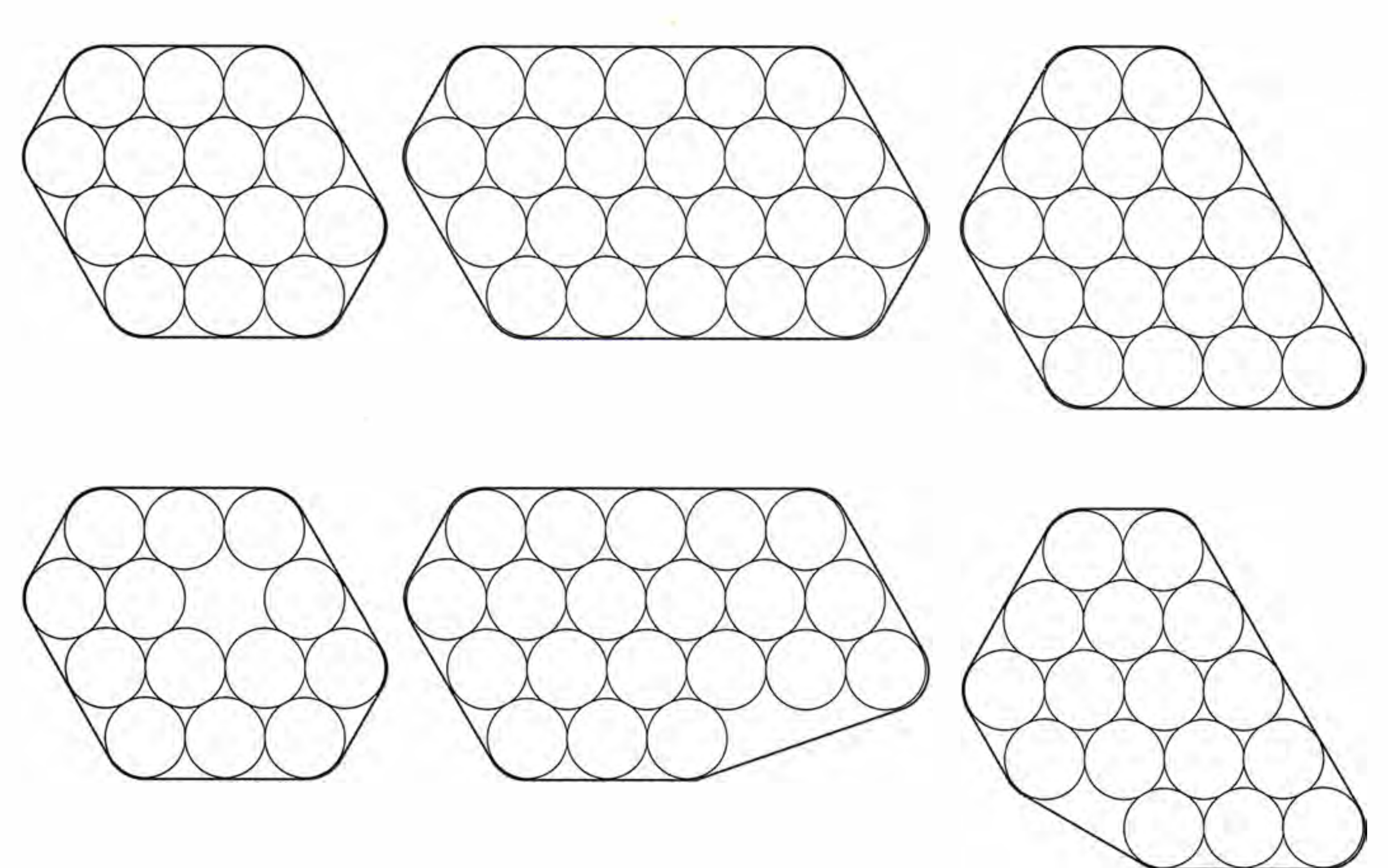
"¿Qué significa 'más bien pequeño', Mina?"

"Quiere decir valores menores o iguales que 56", se apresuró a añadir Mina. "En el caso de ese número de esferas, la disposición cuya envoltura convexa tiene volumen mínimo es una salchicha, esto es, consiste en la colocación de todas las bolas en línea recta. A partir de ahí, las disposiciones minimales se hacen mucho más compactas y redondeadas."

"¿Redondeadas, dice?"

"Pues menos intuitiva es todavía la solución en espacios de cuatro dimensiones o más", explicó Guillermina, sin hacer caso del sarcasmo del jefe.

"Tengo la impresión de que no fabricamos material deportivo cuadridimensional", se chanceó el encargado.



3. Los empaquetamientos de Groemer (fila superior) *alojan los círculos en regiones de área mínima. Los agrupamientos de la hilera inferior no son empaquetamientos de Groemer, y en todos esos casos los círculos pueden ser encerrados en una región más pequeña*

“Pero, como bien ha dicho, señor, lo que importa es el aspecto teórico.”

“Cierto, cierto. ¿Qué es eso de un espacio de cuatro dimensiones?”

“Bueno, los elementos del espacio bidimensional pueden definirse utilizando pares de números, o sea, coordenadas, como (x, y). El espacio tridimensional sería entonces la colección de todas las ternas (x, y, z). De forma análoga, el espacio de cuatro dimensiones estará formado por todas las ristras ordenadas de cuatro números (w, x, y, z), y el espacio n-dimensional es el conjunto de todas las sucesiones de n números, $(x_1, \ldots, x_n)$. En realidad, eso es prácticamente todo.”

“¿Y qué es entonces una esfera en n dimensiones?”

“Es el conjunto de todos los puntos del espacio n-dimensional que se encuentran a una misma distancia —a una unidad, sea por caso— de un punto dado, que es el centro. Claro está, hay que definir el ‘hipervolumen’, o sea, el equivalente para n dimensiones del volumen ordinario, pero no es demasiado difícil.”

“Ya veo.”

“Sea como fuere, la disposición de esferas cuadridimensionales cuya cápsula convexa posee volumen mínimo es la salchicha cualquiera que sea el número de esferas, mientras no pasen de unas 50.000. Así pues, el empaquetamiento óptimo consiste en formar ristras muy largas de esferas, a menos que se tenga una enorme cantidad de ellas.”

“¿Cuántas, exactamente?”

“En algún número comprendido entre 50.000 y 100.000, jefe. Se desconoce para qué valor exacto dejan de ser las ristras la disposición óptima. Pero cuando la situación se torna verdaderamente fascinante es en cinco dimensiones. En fin, ya me entiende; quizá no le embargue la emoción ante una situación así, pero en cinco dimensiones la conjetura tiene su interés, que no es pequeño. Podríamos imaginar que en cinco dimensiones lo mejor es formar salchichas de hasta, aproximadamente, unos 50.000 millones de bolas, pongamos por caso, pero que a partir de ese punto, serían agrupaciones más redondeadas las que tuvieran envolturas convexas de menor volumen; que para seis dimensiones, la cosa sería parecida hasta los 29 trillones, o lo que fuese, y así sucesivamente. Pero en 1975, Laszlo Fejes Tóth enunció la que hoy recibe el nombre de ‘conjetura de la salchicha’, que enuncia que, a partir de cinco dimensiones, la disposición de esferas cuya envoltura convexa tiene volumen mínimo es siempre una salchicha, por grande que sea el número de esferas.”

“¡Santo Cielo!”, exclamó el encargado, verdaderamente sorprendido.

“¿Qué tienen de particular las cinco dimensiones?”, preguntó Mario.

“No se te vaya a olvidar que sólo es una conjetura”, hizo notar Mina. “Pero las indicaciones heurísticas son muy fuertes. La idea fundamental es que, al aumentar el número de dimensiones del espacio, resulta más y más difícil rellenar eficientemente espacio con bolas. Los huecos son multidimensionales y su volumen crece enormemente. Si se hace que la envoltura sobresalga a lo largo de demasiadas dimensiones del espacio se deja muchísimo hueco, con lo cual el volumen total será muy grande. En cambio, si las esferas están confinadas en una sola dirección, en una especie de salchicha, se reduce tanto el volumen desperdiciado que el sistema funciona. Tóth estimó en qué dimensiones empieza a funcionar este argumento, y parece que la transición se produce en la dimensión cinco.

”Todo podría ser mero disparate, desde luego... Nadie lo sabe. Pero sin duda valdría la pena investigar y averiguarlo.”

El encargado se esforzó al máximo por no parecer impresionado. “Lo habéis hecho muy bien los dos. Magnífico trabajo. Pero ahora... hay que volver a la mesa de empaquetado. Tenéis un montón de faena por delante.”

Mario se pasó la hora siguiente haciendo lotes de 56 balones de baloncesto que envolvía en un solo envoltorio de plástico. Tan ufano estaba de su proeza, que llamó al encargado para que echara un vistazo a su trabajo.

“Impresionante, sí señor”, le felicitó el encargado.

Mario alzó cuidadosamente el paquete sobre la cabeza, en señal de triunfo, pero el paquete se curvó por su propio peso y la envoltura se rasgó. Cincuenta y seis balones botaron por toda la sala...

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

RESEARCH PROBLEMS. L. Fejes Tóth en *Periodica Mathematica Hungarica*, vol. 6, págs. 197-199; 1975.

ÜBER ENDLICHE KREISPACKUNGEN IN DER EBENE. Gerd Wegner en *Studia Scientiarum Mathematicarum Hungarica*, vol. 21, págs. 1-28; 1986.

UNSOLVED PROBLEMS IN GEOMETRY. Hallard T. Croft, Kenneth J. Falconer y Richard K. Guy. Springer-Verlag, 1991.

Libros

Luis Alonso, Enric Banda, Agustín Albarracín y Lluis Mas

Colombina

Nueva óptica

El cielo de Colón. Técnicas navales y astronómicas en el viaje del Descubrimiento, por José Luis Comellas. Tabapress; Madrid, 1992.

The worlds of Christopher Columbus, por William D. Phillips, Jr. y Carla Rahn Phillips. Cambridge University Press; Cambridge, 1992.

The tainos. Rise and decline of the people who greeted Columbus, por Irving Rouse. Yale University Press; New Haven, 1992.

Aztec medicine, health, and nutrition, por Bernard R. Ortiz de Montellano. Rutgers University Press; New Brunswick, 1990.

Unos veinte mil títulos se habían escrito sobre el descubrimiento de América antes del Quinto Centenario. Con motivo de la efemérides esa cifra se ha engrosado espectacularmente. Pero no sólo hemos asistido a un incremento cuantitativo. Se atisba cierto salto cualitativo, de mayor rigor en muchos casos y, sobre todo, de enfoque en la llamada "historiografía extranjera", cuyos últimos ramalazos acaban, por ironía de las cosas, de prender en algunos departamentos universitarios de España e Hispanoamérica. Parece oportuno espigar, cerrado el ciclo de las celebraciones, obras representativas de la nueva orientación. De las cuatro seleccionadas, dos miran de preferencia al Viejo Mundo y dos al Nuevo.

Lo mismo que el diario del Almirante, *El cielo de Colón. Técnicas navales y astronómicas en el viaje del Descubrimiento* se lee de corrido, quizá, peligrosamente, de un tirón. Porque José Luis Comellas ha hecho tal esfuerzo de claridad en el comentario de la carta del cielo y los portolanos, en la descripción de los vientos y la distinción entre nao ("Santa María") y carabela ("Pinta" y "Niña"), que hurta reflexión y sentido crítico a cuantos lean lo expuesto en su prosa labrada.

Juan Gil, de la estirpe de nuestros colombinistas Fernández Navarrete, Manzano y Varela, ofrece ya un retazo anticipador en el prólogo, sobre Colón en Sevilla (1488-1492), que en realidad es un ensayo donde se roturan los primeros surcos de prometedora investigación, entre ellos la presencia de los genoveses en Híspalis y su influencia en la buena estrella de la aventura.

De estrellas reales y de planetas comienza hablar Comellas. En primer lugar, del nuestro. Conocerlo es orientarse por él, y orientarse es tomar un sistema de referencia que nos indique las direcciones fundamentales y sus derivadas. Para eso están los mapas. En mar abierto, si nos retrotraemos a las postrimerías del siglo XV, la mejor forma de saber dónde nos encontramos es mirar al cielo; allí, determinadas figuras caprichosas, las constelaciones, con las alineaciones de sus estrellas componentes, nos darán cierta idea de nuestra situación. La estrella Polar, de brillo superior a las *Guardas* (nuestras Beta y Gamma), le señalaba a Colón el Norte. Ardua tarea era entonces conocer la longitud (no se resolverá hasta siglos después) y la latitud del lugar. Lo habitual a bordo era medir ésta con un cuadrante, que, a diferencia del astrolabio, sólo desarrollaba un cuarto de círculo.

La tripulación supera la barra de Saltés el tres de agosto de 1492, rumbo oeste, camino de Cipango (Japón) y Catay (China) con escala en Antilia. Está escrito en el mapa de Paolo del Pozzo Toscanelli, al que Colón y Martín Alonso Pinzón prestan fe ciega. La nao del genovés, de corto y seguro andar con una compleja arboladura, flanqueada por las carabelas, más gráciles y de menor eslora, buscan la ruta segura, para los que le sigan, del paralelo 28 grados Norte. Será su primer acierto. La fortuna le deparará muchos más, antes de poner pie en tierra firme; lo anota en su diario: el Teide en erupción, el "ramo de fuego" (aerolitos), las corrientes atlánticas y, sobre todo, los *Sargazos*, ese mar tranquilo circundado por corrientes atlánticas donde medra un ecosistema de feraz producción primaria. Descubre la variación de la declinación magnética con la longitud, el fenómeno que asustó a los marinos que veían el comportamiento errante de su brújula. Aciertos que se conjugan con espejismos y miedos de quienes no saben a dónde van y sienten el convencimiento de que no podrán volver. Comellas es el escriba que apostilla al Almirante, a Hernando o al padre Las Casas en una suerte de navegación paralela con la ventaja de quien juega con las cartas marcadas, las de su apabullante, sin alardes, saber histórico, astronómico y náutico.

Un buen complemento del libro anterior es *The Worlds of Christopher Columbus*, de William D. Phillips, Jr. y Carla Rahn Phillips. Aunque no orilla los medios instrumentales y técnicos que hicieron posible la expansión geográfica de Europa en la baja Edad Media (los autores les dedican un capítulo de los once de que consta la obra), el texto avanza por raíles políticos, sociales y económicos.

El mundo del siglo XV era un inmenso rompecabezas de piezas irregulares e infinitas, a duras penas reconducibles a los tres continentes más o menos conocidos: Europa, Asia y Africa. Los lazos que unían a unos con otros eran fragmentarios y hechos de nudos que se rompían con la misma rapidez con que se ataban. No hacía mucho se acababa de salir del flagelo de la peste negra y el comercio mediterráneo gozaba de cierta prosperidad. La *pax mongolica* permitía, por su lado, asomarse a un Oriente menos lejano y cruel. Andaluces y portugueses se habían ya acostumbrado a echar sus redes en las vecinas costas africanas. ¿Quiénes, grandes o chicos, protagonizaban cada tratado, cada alianza? ¿Cuáles eran sus intereses y sus movimientos en el tablero de ajedrez? A eso es justamente a lo que responden los Phillips en una secuencia concatenada de estampas, miniaturizadas hasta detalles de sorprendente resonancia.

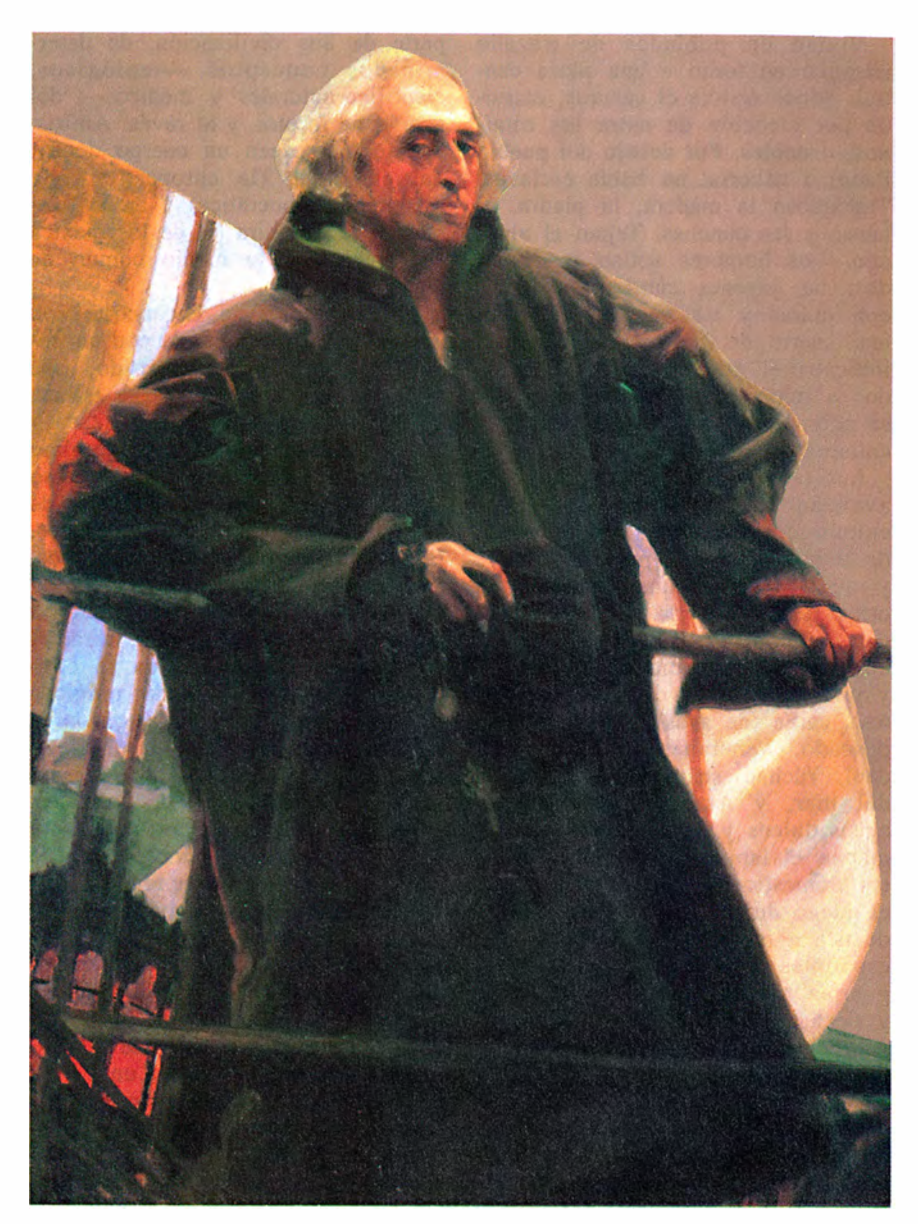
Para ejemplificar su proceder voy a ceñirme a tres casos: la situación de Canarias antes del parón forzoso

de la carabela de timón desencajado (la *Pinta*), la intervención decisiva del rey Fernando en el viaje y las causas de la mortandad de la población india. Los tres cuadros reflejan, además, el acercamiento más objetivo y sereno a que nos referíamos al comienzo.

Para la conquista y explotación de las Canarias, el matrimonio Phillips se ha servido, venciendo la tradicional aprensión foránea, de los trabajos de Fernández Armesto, Marrero y, sobre todo, Ladero Quesada. Parten del primer registro cartográfico de las islas, un portulano mallorquín de 1339, y de los conatos iniciales de su conquista por portugueses y castellanos; al detenerse en la intervención papal protegiendo a Luis de la Cerda, justifican el motivo de tal elección de acuerdo con el tramado de ligámenes familiares de los implicados (biznieto de Alfonso el Sabio y de Luis IX de Francia, señor de las ciudades de Deza, Enciso y Puerto de Santa María por su casamiento con Leonor de Guzmán). Se sucedieron intentos posteriores hasta el primer paso seguro de la conquista definitiva del archipiélago. En la gestión del dominio canario ven un anticipo de lo que sería la conducta regular durante la conquista del Nuevo Mundo: régimen administrativo, relaciones con los naturales y aprovechamiento comercial.

Desesperanzado de hallar en Portugal patrocinio para su aventura, Colón llega con su hijo Diego a España, donde los reyes están absorbidos en la guerra de Granada. Su peregrinaje por la corte y aledaños, sus repetidas defensas ante las juntas de sabios y letrados, terminan por convencerle de que, después de siete años, todas las puertas seguían cerradas. A punto de embarcarse en Palos con rumbo a Francia, visita a Juan Pérez, guardián del convento de La Rábida. Escribe éste a la reina y se convierte en valedor de Colón. En el último momento interviene el rey. Luis de Santángel hace las cuentas: es un riesgo que puede correrse; si fracasa, no se pierde mucho, pero, si acierta, la magra hacienda podría recomponerse hasta quién sabe qué punto. En ningún momento del relato aparece el supuesto desdén real ni la alegada ignorancia de los jueces, sino todo lo contrario.

Por último, las causas del hundimiento demográfico de los indígenas. Conviene aquí separar las cifras reales de habitantes antes del descubrimiento, rebajadas a medida que se ha podido conocer mejor los medios de subsistencia. No hemos de menospreciar el impacto de la lucha desigual entre soldados con armas de fuego y nativos sin metalurgia desarrollada. Pero la historia de la medicina ofrece aquí razones de fuerza mayor. El hemisferio occidental, en su aislamiento, había quedado libre de enfermedades endémicas del Viejo Mundo: gripes, viruela, sarampión, peste bubónica y hasta, quizás, el resfriado común. Sin defensas para superarlas, su introducción involuntaria por los españoles halló presa fácil en mujeres, niños y ancianos. Pero, "No existe ningún episodio de la historia colonial hispana (ni portuguesa) que remede de lejos el caso del general Jeffrey Amherst en América del Norte. En su calidad de comandante de las fuerzas británicas encargadas de terminar con la rebelión india de Pontiac en 1763, Amherst se propuso acabar con los rebeldes recurriendo a la viruela, enviándoles mantas infectadas."


Partida de Colón del puerto de Palos, *cuadro de Joaquín Sorolla*

En su primer viaje, Colón no se encontró con indios, o habitantes del océano Indico, ni siquiera con caribes, sino con los taínos. Tres eran, en efecto, los principales grupos pobladores de las Antillas en el momento de la arribada de los españoles: los taínos, que habitaban las Bahamas y la mayor parte de las Antillas Mayores, los guanahatabey, instalados en el occidente de Cuba, y los isleño-caribes, habitantes de las Antillas Menores. De los primeros nos ofrece Irving Rouse, tras cincuenta años de investigación etnoarqueológica, una exposición magistral en *The Tainos. Rise and Decline of the People who greeted Columbus.*

Vivían en poblados de trazado irregular en torno a una plaza central, donde residía el cacique, extraído por elección de entre los nitaínos, o nobles. Por debajo del pueblo llano, o naboria, no había esclavos. Trabajaban la madera, la piedra, el hueso y las conchas. Tejían el algodón. Los hombres solían ir desnudos; las jóvenes cubrían su frente con cintas y las casadas llevaban una suerte de blusa cuya longitud indicaba el rango social. Aficionados a pintarse, de rojo sobre todo, se adornaban también con plumas y collares.

Los taínos clásicos, el grupo más avanzado, practicaban una agricultura de allanamiento y repleción de tierras aluviales, pero no la tala y quema del bosque, habitual en otros lugares del trópico. Conocían una dieta variada de vegetales (casaba, batata, maíz, cidrayota, fríjoles y pimientos, amén de múltiples frutos), carne (de aves en particular) y pescado. Veneraban una divinidad dual, Yúchau, señor de la casaba y del mar, y Atabey, diosa de las aguas dulces y de la fertilidad. Fumaban el tabaco cultivado en huertos domésticos y se divertían con el juego de la pelota. Comerciaban de isla a isla con sus canoas (los españoles introdujeron la vela) y guerreaban con mazas, lanzas, arcos y flechas.

Procedían los taínos de otros pueblos invasores de las Indias orientales, los saladoides, vía los ostionoides, cuyas culturas, y las de sus precedentes, Rouse recompone a través del examen de los restos cerámicos. El descubrimiento fue, pues, una segunda repoblación, con una característica muy peculiar: la tradición cultural y biológica taína se salvó en parte con los matrimonios mixtos (el 40 por ciento). "Ambos grupos se imbricaron tan estrechamente que se fundieron hasta formar un nuevo pueblo mestizo. Aun cuando la raza, la cultura y el lenguaje (en cuanto formas autónomas) desaparecieron en el proceso, han sobrevivido rasgos taínos, lo que distingue nítidamente a los hispano-indios occidentales de los indios occidentales de sujeción británica, holandesa y francesa."

De un calado muy superior era la cultura con que se encontró Cortés en 1519, delineada por Bernard R. Ortiz de Montellano en lo que a los aspectos biomédicos concierne en *Aztec Medicine, Health, and Nutrition*. Aquí, "sincretismo" constituye la palabra núcleo, con la que se quiere significar la adopción, por parte de una civilización, de determinados conceptos —teológicos, científico-naturales y médicos— del acervo de la otra, y al revés. Ambas, en efecto, poseen un cuerpo doctrinal elaborado (la europea de raíz aristotélico-hipocrática) y ambas tienen en la escritura (la de los mexica es jeroglífica) su medio común de expresión.

Los españoles se encuentran con una sociedad estructurada con un poder rígidamente centralizado, que dicta leyes, fija tributos y se asienta en una administración jerarquizada y en un ejército regular. Hay una clase señorial, la de los *pipiltin*, el pueblo llano, los *macehualtin*, los siervos de la gleba, o *mayerque*, y los esclavos, *tlatlacotin*. Pero no son grupos estancos, y cabe cierta movilidad, hacia arriba del soldado que demuestra bravura, o hacia abajo del infractor condenado. No se hereda la condición de esclavo. El poder religioso se imbrica en el civil y la sucesión de las estaciones, señalada en el calendario, que marca el curso de las cosechas, se celebra con ritos cultuales.

Los europeos no tenían, pues, ante sí, al taíno neolítico, sino alguien de quien podían incluso aprender. Bernardino de Sahagún, el primer antropólogo con metodología estricta, se consagra, para mayor eficacia misionera, a estudiar el mundo religioso de los aztecas, su lengua y su cultura. Se rodea, a imagen de la *Historia Natural* de Plinio, de un núcleo de informantes. Así nacieron los *Primeros Memoriales,* borrador que luego se iría perfeccionando con la contrastación de otras aportaciones. Ortiz de Montellano lo toma como el autor más fiel de los cuatros en que él funda su interpretación, seguido de Francisco Hernández, el médico enviado por Felipe II para estudiar las enfermedades y los remedios de Nueva España, y que quedó maravillado del conocimiento que los aztecas habían alcanzado, hasta el punto de que dialoga con ellos como uno *inter pares*. Menos fiables o útiles son el *Codex Badianus* y el trabajo de Ruiz de Alarcón.

Para los aztecas, la organización y fisiología del cuerpo humano corrían paralelas a la estructura y funcionamiento del cosmos; además, había una mutua interrelación: el cuerpo se resentía de los fenómenos celestes y podía, a su vez, influir en el equilibrio y estabilidad del firmamento a través, de manera particular, de los sacrificios humanos. En todo regía un absoluto dualismo de contrarios (frío y calor, arriba y abajo, cielo y mundo subterráneo, noche y día, vida y muerte). El hombre, creado de materia celeste y terrenal, constituía en sí mismo un microcosmos.

La dieta azteca se basaba en el maíz, el alga *tecuitlatl* (*Spirulina geitlerii*), fríjoles, pimientos y tomates; satisfacían los requerimientos proteicos con diversos herbívoros, en especial el pavo. (Los españoles se habituaron a su consumo y se trajeron muy pronto plantas y animales a Europa.) Los acueductos suministraban agua potable. Las epidemias, que hallan tierra abonada en las deficiencias alimentarias, hicieron escasa mella. Las enfermedades se atribuían a una triple causa (sobrenatural, mágica y natural) y buscaban en tres instancias correspondientes su remedio (religión, placebos y drogas vegetales). Creíase que la condición morbosa obedecía a un desequilibrio de las fuerzas que regían las funciones del cuerpo humano: *tonalli*, que residía en la cabeza; *teyolia*, con sede en el corazón, e *ihiyotl*, en el hígado. Se hace inevitable la evocación de las tres *virtutes* del galenismo clásico europeo. (L. A.)

Geología

Paleomagnetismo

PALEOMAGNETISM OF THE ATLANTIC, TETHYS AND IAPETUS OCEANS, por Rob Van der Voo. Cambridge University Press; Cambridge, 1993.

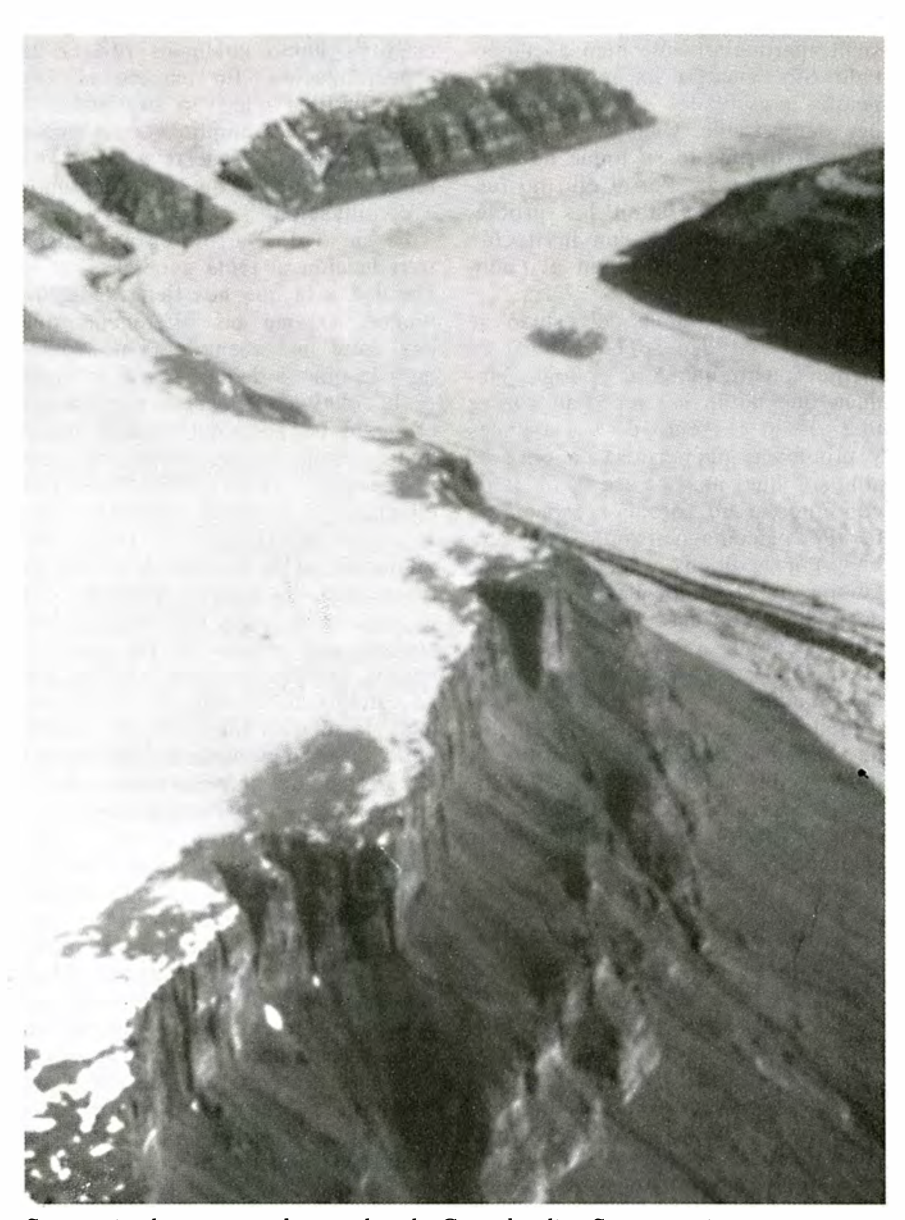
De los aproximadamente 40 años de historia académica que cuenta el paleomagnetismo, los veinte recientes han asistido a una extraordinaria actividad y fertilidad científica, que han representado un gran avance en el desarrollo de esta disciplina, lo que a su vez ha permitido abrir nuevos caminos en el proceso del conocimiento geológico de nuestro planeta. Rob Van der Voo nos ofrece en *Paleomagnetism of the Atlantic, Tethys and Iapetus Oceans* una visión global al mismo tiempo que nos resume los principales progresos realizados en los dos decenios mencionados. La referencia oceánica nos señala su interés por abordar la práctica totalidad de la geología de la Tierra, ya que abarca las masas continentales que rodean el Atlántico —tal como lo conocemos hoy—, las que rodeaban el Tetis —del que el Mediterráneo no es más que un residuo—, y las relacionadas con el Jápeto —océano hoy desapa-

recido—, cubriendo, por tanto, una buena parte de la geología del planeta en el espacio y en el tiempo.

Los primeros capítulos del libro (2 al 4) proporcionan al lector las bases y técnicas del paleomagnetismo. Estos capítulos corresponden, de hecho, a lo que sería una síntesis de un manual básico elaborado con maestra habilidad. Sin embargo, no están planteados como un apartado a partir del cual poder llevar a cabo análisis paleomagnéticos, sino que presenta el material de base para una correcta comprensión de los capítulos que siguen. El tercero, muy breve, se detiene en las nociones fundamentales (terreno, bloque, microplaca, etcétera), que el autor utilizará en capítulos posteriores; sorprenderá quizás al lector, puesto que son conceptos que se desprenden de la tectónica de placas, teoría en el marco de la cual el libro se inscribe. Pero creo adivinar que la inclusión del capítulo 3 no responde más que a la rigurosidad del autor en su empeño por transmitir que los resultados del paleomagnetismo deben ser geológicamente interpretados de acuerdo con las limitaciones de la adquisición de datos. ¡Cuántas interpretaciones erróneas se han deslizado en la literatura especializada por no atender a la particular situación de las rocas muestreadas, que pertenecen a un terreno desplazado (litosferoclastos) y no a un continente en sentido geológico estricto!

El capítulo 5 revisa las posibles configuraciones del supercontinente Pangea a partir de los grandes continentes que lo componen: Gondwana (a su vez, un amasijo de continentes), Norteamérica y Europa. Los capítulos finales, del 6 al 8, relatan los resultados paleomagnéticos distribuidos de acuerdo con su afinidad con el desarrollo de los océanos Atlántico, Tetis o Jápeto. Resumen, o por mejor decir, someten a criba los avances atribuidos al paleomagnetismo en el conocimiento de la evolución geológica de los continentes y sus subproductos.

Una de las razones por las que, en mi opinión, el libro tendrá vigencia longeva es el espléndido trabajo que el autor ha realizado al analizar los resultados publicados en la bibliografía paleomagnética. Rob Van der Voo establece unos criterios de clasificación de los resultados a partir del examen crítico de los datos. El lector no especializado puede, con razón, pensar que eso es una obviedad. Aun siéndolo, la literatura paleomagnética está plagada de "resultados" para los que no se especifica



Secuencia de rocas carbonatadas de Groenlandia. Su magnetismo remanente es de origen reciente

con suficiente claridad una serie de detalles que son decisivos para su interpretación. Lejos de ejercer una crítica injusta, hay que acudir a la juventud de la técnica a la hora de justificar "resultados" para los que se desconocen detalles relativos al proceso que va desde la adquisición de muestras en el campo hasta su tratamiento en el laboratorio. En consecuencia, Van der Voo ha optado por utilizar siete criterios de confianza que sirven para calificar cada uno de los resultados publicados en la literatura especializada. A la estadística inherente al método del paleomagnetismo, el autor añade esos criterios de confianza que le permiten tanto confirmar como rechazar, o poner en duda, resultados extraídos de la bibliografía. De esta forma, el apéndice del libro, que recoge más de 2000 resultados paleomagnéticos, con sus correspondientes citas, se convierte en un tesoro con el valor añadido de indicar si se cumplen o no los criterios de confianza establecidos. El lector puede, por tanto, comprobar las aseveraciones del autor, y puede naturalmente discrepar y elaborar un estudio alternativo en una clara invitación a la práctica del método científico.

En los capítulos del 6 al 8, que constituyen el auténtico núcleo de la obra, Van der Voo hace gala de su extenso y profundo conocimiento tanto de paleomagnetismo como de geología. Naturalmente, y como sucede en cualquier trabajo que cubre regiones extensas como las abordadas aquí, uno puede estar en desacuerdo con los detalles que se refieren a un área de la que uno se

siente particularmente bien documentado. Sin embargo, los resultados generales presentados son de una solidez demostrable. Cuando no lo son, el autor ha puesto su toque de atención y prudencia. Por si ello no fuera suficiente, se citan los problemas no resueltos en una invitación y estímulo al progreso en el conocimiento.

Van der Voo habla del estado de "bloqueo" en que se encontraba su mente al enfrentarse al epílogo, bloqueo que no le ha impedido darnos una visión exigente de los avances y problemas planteados. La obra de síntesis que nos ofrece será leída con interés, no sólo por especialistas en paleomagnetismo, sino también por geólogos y geofísicos que laboran en el campo de la evolución del planeta. La cantidad de información recabada y el reto que supone mejorar las conclusiones y apuntar soluciones a los problemas no resueltos será, sin duda, un motor que pondrá en funcionamiento la imaginación del lector, quien, al final, escribirá su propio epílogo, sin duda diferente del redactado por el autor. (E. B.)

Física teórica

Unificación

THE PHYSICAL UNIVERSE: THE INTERFACE BETWEEN COSMOLOGY, ASTROPHYSICS AND PARTICLE PHYSICS. Dirigido por J. D. Barrow. Springer Verlag; Heidelberg, 1991.

El libro corresponde a los *Proceedings* de una típica "escuela" para licenciados y doctores, que tuvo lugar en Lisboa el otoño de 1990 y que debió desarrollarse en un ambiente placentero, a tenor de las muestras de agradecimiento de los intervinientes. Como todos los libros de ese tenor, el índice de las cuestiones abordadas es muy variopinto. Podemos dividirlos en dos, de acuerdo con el estilo: los que corresponden a cursos o cursillos de varias horas y los que corresponden a simples seminarios. El tema general de la escuela está muy vivo. No hace más de 15 a 20 años que se ha caído en la cuenta de la posible intervención de la física de partículas en la explicación de la formación de la estructura actual del universo.

Para quien no asistiera a la conferencia, ni trabaje en ese dominio, los seminarios son ininteligibles, tan crípticos como cualquier revista de especialización. En cambio sí hay seis cursillos que van destinados a un público más amplio por su carácter de revisión y puesta a punto del tema que tratan y que comentaremos a continuación.

El curso de Barrow es una buena introducción al tema general. Con la claridad a la que nos tiene acostumbrados, expone las diferencias que hay entre una cosmología newtoniana y la que se deduce como estándar de la relatividad general, tanto desde el punto de vista del modelo matemático como de sus respectivas consecuencias observacionales; por ejemplo, de la teoría newtoniana no se deduce la existencia de ondas gravitatorias, ni la existencia de agujeros negros. La certeza observacional de alguno de estos dos hechos, hay acuerdo casi general en los agujeros negros, elimina la teoría newtoniana. El estudio de la solución de Friedman, la métrica que cumple el principio cosmológico, le conduce a su vez a comparar la relatividad general con teorías que parten de lagrangianos de orden superior al de la relatividad y más relacionadas con las modernas teorías de supercuerdas. Algunas de estas teorías evitan que los agujeros negros desaparezcan del todo por la llamada evaporación de Hawking. El mismo Barrow ha investigado recientemente alguno de estos lagrangianos de orden superior.

El más extenso fue el curso de Copeland sobre "Defectos topológicos en el universo primitivo". La contribución de la física de partículas a la cosmología se divide en dos campos, los defectos topológicos y los modelos inflacionarios, prescindiendo del estudio de los primerísimos instantes en los que además entraría la gravedad cuántica. Las observaciones actuales imponen unas ligaduras muy duras a los parámetros de los modelos inflacionarios, por lo que éstas han perdido, al menos en parte, su carácter de tema de moda, como deducimos de este mismo libro ya que no hay ningún curso dedicado exclusivamente a modelos inflacionarios.

En la actualidad se estudia mucho más la posible influencia de los defectos topológicos en la formación de la macroestructura del universo. La idea es que el universo primitivo muy caliente sufrió al enfriarse cambios de fase que rompen espontáneamente las simetrías, dejando ocasionalmente, por aquí o por allá, algunos restos de la antigua fase simétrica que serían los llamados defectos topológicos: cuerdas cósmicas o vórtices de una dimensión, paredes cósmicas de dos dimensiones o bien monopolos magnéticos de tres dimensiones. El curso de Copeland explica cómo se formarían las cuerdas cósmicas y las texturas globales, cómo evolucionarían con el tiempo y de qué manera colaborarían a la formación de la estructura global del universo.

Gibbons introduce los monopolos magnéticos en cosmología a partir de las teorías de gran unificación (GUT) añadiendo el espacio curvo de la relatividad general. El problema que plantea su no observación podría resolverse con un modelo cosmológico inflacionario. El curso estudia las propiedades gravitatorias de los monopolos magnéticos y la relación que hay entre monopolos y agujeros negros, temas en los que Gibbons ha obtenido recientemente buenos resultados.

Vienen a continuación los cursos dados por dos astrofísicos, Jones y Longair. Se proponen describir, y en parte justificar, la idea actual de la configuración a gran escala del universo, a partir de las observaciones. Conviene recordar que las técnicas de observación permiten construir modelos tridimensionales del universo, sobre todo porque hay estimaciones de distancias a las galaxias independientes del corrimiento hacia el rojo. Los mapas dan cúmulos de galaxias y cuasivacíos ingentes, amén de sugerir la existencia de estructuras filamentosas. Para ello han sido fundamentales las observaciones hechas con el *IRAS* (satélite con un telescopio sensible a los rayos infrarrojos), ya que para el análisis de donde vienen los infrarrojos hacia nosotros la Via Láctea no representa ningún estorbo. Destaca la exposición de la búsqueda de las llamadas galaxias jóvenes, o sea de galaxias en formación, a partir de estudios de la radiación infrarroja profunda y de la submilimétrica, zona en la que destacarían dichas galaxias.

M. Moles, por fin, da un repaso claro de la confrontación entre el modelo de la expansión del universo y las pruebas globales observacionales. Pese a los denodados esfuerzos de los astrónomos en los últimos 30 años todavía no tenemos buenos valores para los parámetros cosmológicos; por ejemplo, la constante de Hubble sigue teniendo un margen amplio de posibilidades y la densidad de materia observada está muy por debajo del valor que daría el esperado universo cerrado. (L. M.)

Intercambio científico

Junta para Ampliación de Estudios

Relaciones culturales entre España y América: la Junta para Ampliación de Estudios (1907-1936), por Justo Formentín Ibáñez y María José Villegas Sanz. Editorial Mapfre; Madrid, 1992.

Dos reflexiones previas. La primera concierne a Hispanoamérica: hace ya muchos años que vengo proclamando que si, de acuerdo con la sentencia, un hombre no lo es de veras en tanto que no planta un árbol, escribe un libro y tiene un hijo, si ese hombre es español, a esa triple exigencia debe añadirse la de haber pisado la tierra hermana de allende el océano. Y ello, porque el contacto directo con la realidad americana permite conocer *de facto* qué fue lo que los descubridores y cuantos les siguieron en siglos sucesivos llevaron a cabo en aquellos países. Doble conocimiento que, de una parte, afecta a la materialidad de la obra realizada en lo concerniente a monumentos —catedrales, iglesias, palacios, etc.—, pero que también, de modo más sutil, alude a la labor intelectual desarrollada por las tempranas universidades o sus primeros libros impresos.

Todo este trasiego de ciencia y cultura iniciado en el siglo XVI vivió otro momento de esplendor al iniciarse el siglo XX, en historia hasta ahora no bien conocida y en la que desempeñó un papel fundamental la Junta para Ampliación de Estudios (JAE).

Aquí la segunda reflexión, en torno al significado de la Junta en la historia de la cultura española. Sabemos bien lo que más tarde, con el exilio del 39, iba a suponer la tarea de unos científicos, en su mayor parte formados en Europa a expensas de la Junta, que llevaron a tierras americanas su saber y su profesionalidad, creando allá escuelas de investigadores que se han mantenido hasta la actualidad. Sabemos también —yo mismo me he ocupado del tema en distintas ocasiones— que la formación europea de esos españoles que disfrutaron de los beneficios de la Junta fue posible gracias a la perspicacia y al impulso de un hombre privilegiado, José Castillejo, verdadero promotor de la nueva salida a Europa de un ramillete de españoles que tomaron sobre sus hombros "la futura y alta misión espiritual de España" —así rezaba el manifiesto de la Residencia de Estudiantes en 1914— consistente en "cumplir dignamente, cuando sea llamado a ello, lo que de él exijan los destinos históricos de la raza".

Aquella perspicacia y ese impulso cristalizaron en una decisión trascendental: la formación de ese "ramillete de españoles" se haría al margen de la universidad y en el ámbito anglosajón y germánico, cuyos métodos de docencia e investigación, por motivos bien estudiados entre nosotros, distaban abismalmente de la tradicional formación napoleónica, hasta entonces servilmente seguida en España. Su modelo, el laboratorio, concebido como centro de investigación más bien que de docencia. La Junta para Ampliación de Estudios y sus laboratorios se crean como posibilidad de dedicación a la investigación, asimilación de las mejores virtudes del extranjero y semillero para la instrucción del futuro cuerpo docente de la universidad y de la escuela. Con ella, la historia de la cultura española sufre un verdadero giro copernicano.

Pienso que este doble preámbulo era necesario para centrar la lectura del libro que comento. La investigación que tan pormenorizadamente en él se nos ofrece corresponde a la historia de la JAE en estos sus comienzos, pero vertida a un ámbito hasta ahora prácticamente desconocido: el de Hispanoamérica primero, luego el de los Estados Unidos de América. Justo Formentín y María José Villegas, excelentes investigadores de la historia de la Junta, a la que han consagrado múltiples publicaciones, nos ofrecen una pormenorizada exposición, basada fundamentalmente en los archivos y *Memorias* de la Junta.

Independientemente de la política de pensiones en Europa, la JAE fijó también su atención en el nuevo continente, si bien su interés por el aprendizaje de nuevas técnicas y métodos capaces de modernizar la ciencia española hizo conveniente adoptar una actitud diferente ahora: limitado número de becarios con el objeto primordial de establecer relaciones con los centros de investigación, con vistas al futuro fomento de aquéllas; envío de profesores a congresos científicos o invitados por centros hispanoamericanos que llevaron la representación de la Junta; y fundamentalmente la creación de instituciones culturales españolas en distintas repúblicas: las Instituciones Culturales Españolas de Buenos Aires, Uruguay, Puerto Rico y Santo Domingo, el Instituto de Filología de la Universidad de Buenos Aires, el Departamento de Estudios Hispánicos de la Universidad de San Juan de Puerto Rico, el Instituto Hispano-Mexicano de Intercambio Universitario, la Institución Hispano-Cubana de Cultura y otros establecimientos difíciles de estudiar, por falta de documentación, en otros países del nuevo continente. Baste tan sucinta mención para comprender la trascendencia que estas actividades habían de tener, como fundamento de lo que decenios después constituiría el fenómeno cultural y científico del exilio. De ahí la importancia de este estudio de Formentín y Villegas, imprescindible para entender en toda su amplitud el sentido y la posibilidad de ese futuro inmediato.

Pero la tarea de la Junta no se limitó a esta cimentación sino que, de otra parte, hubo también un ramillete de hispanoamericanos que vinieron a España y trabajaron en los centros de aquélla. Los autores del libro nos informan también de las aportaciones en metálico y materiales que Hispanoamérica ofreció a la Junta para Ampliación de Estudios.

La segunda parte de la obra está dedicada al estudio de estas mismas relaciones culturales y científicas, establecidas también entre la Junta y los Estados Unidos de Norteamérica. Tras exponer las razones de este intercambio se nos ofrece un panorama del encuentro de los pensionados españoles —un total de 55— con la ciencia norteamericana así como de los estudios y trabajos que allí llevaron a cabo. Ahora es la ciencia española la que se beneficia de los contactos con el gran país norteamericano. Así nos lo hace ver el pormenorizado estudio que los autores realizan de las características de las becas, circunstancias de sus beneficiarios —en gran parte mujeres—, centros donde trabajaron e instituciones que ayudaron al intercambio, puesto que también ahora hubo pensionados norteamericanos en España.

Quiero señalar un ligero reparo, no achacable por supuesto a los autores del libro sino a la manquedad de las referidas fuentes que a la hora de esbozar los *curricula* de los pensionados deja sin detallar datos biográficos de los mismos tan fundamentales como su fecha de nacimiento. Para los que estamos dedicados a investigar en los archivos universitarios es éste un problema sin solución, puesto que, al parecer, en su momento tal dato no parecía ser muy importante. (A. A.)

Apuntes

¿Ecología *avant la lettre*? Tal parece el siguiente texto que extraemos, sin corregir la ortografía, de la *Historia natural del jénero humano*, de J. J. Virey, traducido en Barcelona en 1835: "Estas mareas ó reflujos de la especie humana, estas asolaciones, estas irrupciones, estas colonias, y por fin estas conquistas y todas estas revoluciones que se han atropellado por el largo discurso de los siglos, no son mas que el restablecimiento sucesivo de equilibrio en el sistema de los entes organizados; pues se ha notado que estas grandes catástrofes fueron casi siempre producidas por las naciones pobres ó sobrado numerosas con respecto á los productos del suelo que habitan."

Las desgracias nunca vienen solas. Los finísimos meteoroides de la lluvia de las Perseidas pueden dañar de gravedad a los satélites artificiales que caigan bajo su radio de acción. Este año, en que la Tierra pasa cerca de la cola del cometa Swift-Tuttle, el chirimiri se convertirá en tormenta de verano. El *Telescopio Espacial Hubble* tiene una posibilidad entre mil de recibir un impacto de un meteroide. En su racha de fracasos, realmente llovería sobre mojado.

Las erupciones volcánicas arrojan a la atmósfera importantes cantidades de cloro y azufre gaseosos. Buena parte del dióxido de azufre emitido alcanza la estratosfera, donde se oxida y forma sulfatos aerosólicos que intervienen en la síntesis y degradación del ozono. Los gases de cloro quizá no lleguen tan alto. El estudio físico-químico de las plumas volcánicas sugiere que, a medida que emerge clorhídrico, el agua superenfriada lo va eliminando de la pluma.

Aunque todos los factores tienen su función en el mantenimiento normal de la vida de un organismo, algunos cumplen misiones más delicadas que otros. Los factores específicos que promueven la pervivencia de las neuronas dopaminérgicas del mesencéfalo revisten particular interés clínico, ya que estas células se degradan en la enfermedad de Parkinson. Se ha conseguido purificar y clonar el factor responsable. Se trata del factor neurotrófico derivado del linaje celular de la glía: una proteína homodimérica y glicosilada. *In vitro*, el factor caracterizado refuerza la pervivencia y diferenciación de las neuronas dopaminérgicas, amén de aumentar su absorción de dopamina.

El uso médico del cáñamo (*Cannabis sativa*) se remonta más de mil quinientos años antes de la era cristiana. Lo atestigua el papiro de Ebers. En la farmacología grecorromana, el cáñamo tenía un papel secundario. De su eficacia reforzante de las contracciones uterinas no se habló hasta mediados del siglo pasado. Pero un descubrimiento reciente de su presencia junto a los restos óseos de una joven en Beit Shemesh (Jerusalén), del siglo IV de nuestra era, arroja nueva luz sobre el conocimiento de ese poder del cáñamo. La adolescente, con una pelvis inmadura, tiene en su regazo un feto o niño recién nacido. Verosímilmente se le dio a inhalar la planta quemada para facilitar el alumbramiento.

¿Son obscuros o transparentes los discos de las galaxias? Para la tesis tradicional serían transparentes, mientras que la opinión más reciente aboga por profundidades ópticas sustantivas. (Profundidad óptica es el tecnicismo que se emplea para indicar la obscuridad creada por el polvo estelar.) Pero no se podía determinar por métodos directos dónde estaba la razón. La segunda hipótesis acaba de recibir sólido respaldo a través de la comparación del decremento de Balmer de una galaxia de fondo con esas mismas relaciones $H\alpha/H\beta$ en galaxias espirales.